

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ИМЕНИ И.М. ГУБКИНА

На правах рукописи



СЕРИКОВ ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА  
С КОСОЗУБЫМ ВООРУЖЕНИЕМ**

Специальность:

05.02.13 - Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:

д.т.н., проф. В.Я. Кершенбаум

Москва – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>ГЛАВА 1. АНАЛИЗ РАБОТЫ, КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА</b> .....	15
1.1 Анализ процесса кинематического взаимодействия и условий работы вооружения шарошечного бурового инструмента .....	15
1.2 Конструкции и технологические процессы изготовления вооружения шарошечного бурового инструмента .....	22
1.3 Анализ процесса промывки и конструктивных особенностей промывочных систем шарошечного бурового инструмента .....	42
Выводы по главе 1 .....	55
<b>ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИНЕМАТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОСОЗУБОГО ВООРУЖЕНИЯ ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА С ЗАБОЕМ ПРИ КЛАССИЧЕСКОМ И РЕАКТИВНО-ТУРБИННОМ БУРЕНИИ</b> .....	56
2.1 Исследование процесса взаимодействия косозубого вооружения с забоем скважины при бурении мягких пород .....	56
2.2 Исследование процесса взаимодействия косозубого вооружения с забоем скважины при бурении пород средней категории твердости .....	64
2.3 Математическое моделирование процесса перекатывания шарошки бурового инструмента при бурении мягких и средних пород .....	70
2.4 Исследование процесса проскальзывания по забою зубьев вооружения шарошечного бурового инструмента .....	76
2.5 Методика определения положения мгновенной оси вращения шарошки бурового инструмента в процессе его работы .....	83
2.6 Определение геометрических параметров вооружения, обеспечивающих повышение эффективности работы инструмента в процессе бурения мягких пород ....	89
2.7 Определение геометрических параметров вооружения, обеспечивающих повышение эффективности работы инструмента в процессе бурения средних пород ...	99
2.8. Исследование кинематики шарошечного долота в процессе его работы в составе агрегата реактивно-турбинного бурения .....	104
Выводы по главе 2 .....	112
<b>ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОСОЗУБОГО ВООРУЖЕНИЯ ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО</b>	

<b>ИНСТРУМЕНТА С ЗАБОЕМ</b> .....	116
3.1 Изучение факторов, влияющих на эффективность разрушения мягких и средних пород вооружением шарошек .....	116
3.2 Исследование процесса силового взаимодействия зубьев вооружения шарошек с забоем .....	122
3.3 Исследование работы шарошечного бурового инструмента в процессе бурения мягких и средних пород .....	133
3.4 Исследование отклоняющих и стабилизирующих сил, возникающих в процессе работы косозубого вооружения шарошечного бурового инструмента .....	145
3.5 Исследование факторов, влияющих на эффективность разрушения средних и твердых пород вооружением шарошечного бурового инструмента .....	149
3.6 Исследование процесса взаимодействия зубчатого вооружения с забоем при работе шарошечного долота в составе агрегата реактивно-турбинного бурения .....	157
Выводы по главе 3 .....	167
<b>ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЬЕВ И АРМИРОВАННОЙ ЗОНЫ НА ПРОЧНОСТЬ ВООРУЖЕНИЯ ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ЕГО РАБОТЫ</b>	169
4.1 Методика расчета максимальных изгибающих нагрузок, действующих на зубья шарошечного бурового инструмента, работающего без проскальзывания вооружения .....	169
4.2 Сравнительный анализ статической прочности прямозубого и косозубого поверхностно-армированного вооружения .....	171
4.3 Исследование напряженного состояния центробежно-объемно-армированного косозубого вооружения ведущих венцов шарошечного бурового инструмента .....	180
4.4 Методика расчета максимальных изгибающих нагрузок действующих на вооружение ведомых венцов в процессе работы шарошечного бурового инструмента .....	187
4.5 Сравнительный анализ напряженного состояния симметричных и асимметричных зубьев центробежно-объемно-армированного косозубого вооружения ведомых венцов шарошечного бурового инструмента .....	191
4.6 Математическое моделирование процесса центробежного объемного армирования асимметричного косозубого вооружения шарошечного бурового инструмента .....	200
4.7 Расчет геометрических параметров зоны армирования, обеспечивающей повышенную стойкость зубьев вооружения шарошек к ударным нагрузкам .....	215
4.8 Методика определения модуля упругости армирующего композиционного материала, используемого для упрочнения вооружения шарошечного бурового инструмента .....	221

4.9 Методика определения допускаемого напряжения при изгибе армирующего композиционного материала .....	226
4.10 Экспресс-методика расчета на прочность армированного зубчатого вооружения по допускаемым напряжениям изгиба .....	228
4.11 Определение циклической прочности центробежно-объемно-армированного вооружения шарошечного бурового инструмента .....	232
4.12 Методика определения геометрических параметров вооружения бурового инструмента на основе процесса математического моделирования .....	245
Выводы по главе 4 .....	256
<b>ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОМЫВКИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОМЫВОЧНЫХ СИСТЕМ ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА С КОСОЗУБЫМ ВООРУЖЕНИЕМ .....</b>	<b>259</b>
5.1 Совершенствование способов крепления гидромониторных насадок в промывочных узлах шарошечного бурового инструмента .....	259
5.2 Исследование процесса истечения струи из гидромониторных насадок с асимметричным поперечным сечением .....	268
5.3 Разработка конструктивной схемы центрального гидромониторного узла шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением .....	280
5.4 Разработка конструктивной схемы бокового гидромониторного узла шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением .....	294
5.5 Исследование гидродинамических процессов, происходящих при работе косозубого вооружения .....	306
Выводы по главе 5 .....	316
<b>ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА НОВЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА С КОСОЗУБЫМ ВООРУЖЕНИЕМ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ .....</b>	<b>317</b>
6.1 Разработка конструктивной схемы шарошечного бурового долота с косозубым вооружением и центральной промывкой .....	317
6.2 Разработка конструктивных схем шарошечных буровых долот с косозубым вооружением и боковой промывкой .....	323
6.3 Совершенствование геометрии вооружения ведомых венцов шарошечного бурового инструмента .....	334
6.4 Совершенствование конструкций вооружения шарошечного бурового инструмента с целью минимизации эффекта рейкообразования .....	338



6.5 Совершенствование геометрии вооружения шарошечных расширителей .....	352
6.6 Разработка конструкции шарошечного долота для бурения мягких пород в составе агрегатов реактивно-турбинного бурения .....	360
6.7. Разработка конструкции шарошечного долота для бурения средних абразивных пород в составе агрегатов реактивно-турбинного бурения .....	365
6.8 Разработка конструкции шарошечного долота для бурения твердых пород в составе агрегатов реактивно-турбинного бурения .....	371
6.9 Промышленные испытания опытных образцов шарошечного бурового инструмента новых конструкций .....	374
6.9.1 Объекты промышленных испытаний .....	374
6.9.2 Результаты промышленных испытаний .....	380
Выводы по главе 6 .....	384
<b>ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ</b> .....	387
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	389
Приложение А. Рецензия на книгу «Повышение эффективности шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением» .....	404
Приложение Б. Справки об изготовлении .....	407
Приложение В. Акты промышленных испытаний .....	410
Приложение Г. Акты внедрения результатов работы .....	431

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

Российская Федерация является одним из мировых лидеров по добыче углеводородного сырья и других стратегически важных полезных ископаемых. Дальнейшее динамичное и инновационное развитие экономики страны, в условиях обострения мировой конкуренции, нуждается в серьезном качественном совершенствовании нефтяной, газовой и других базовых отраслей промышленности, являющихся фундаментом экономики нашей страны.

Развитие нефтегазовой отрасли в значительной степени связано с увеличением объемов и уменьшением стоимости буровых работ. Одним из важнейших элементов газонефтепромыслового оборудования, непосредственно разрушающим горную породу и формирующим ствол скважины, является породоразрушающий буровой инструмент (ПБИ). В нашей стране и за рубежом основной объем бурения осуществляется буровыми долотами различных типов и конструкций [14, 15, 23, 37].

Несмотря на тот факт, что в последнее время значительно увеличились объемы буровых работ, осуществляемых алмазным буровым инструментом Polycrystalline Diamond Bits (PDC), использование классического шарошечного инструмента до сих пор занимает существенное место в общем объеме применяемого бурового инструмента. В особенности это касается расширителей скважин и буровых долот больших типоразмеров от 393,7 до 660,4 мм и более, где стоимость изготовления алмазного инструмента значительно увеличивается, а процесс бурения требует существенного увеличения крутящего момента и, как следствие, энергетических затрат.

Большой вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований в области совершенствования шарошечного бурового инструмента (ШБИ) внесли такие ученые и инженеры, как: Агошашвили Т.Г., Бикбулатов И.К., Близиюков В.Ю., Блинков О.Г., Богомолов Р.М., Бугай Ю.Н., Буримов Ю.Г., Вадецкий Ю.В., Варламов Е.П., Васильев А.В., Виноградов В.Н., Владиславлев Ю.Е., Гинзбург Э.С., Гусман А.М., Жидовцев Н.А., Ильский А.Л., Иоаннесян Р.А., Кершенбаум В.Я., Константинов Л.П., Кораблев Г.А., Крылов К.А., Кузмак Е.М., Линдо Г.В., Мавлютов М.Р., Матвеев Г.И., Мокшин А.С., Палий П.А., Панин Н.М., Рубарх В.М., Симонов В.В., Сорокин Г.М., Стеклянов Б.Л., Травкин В.С., Торгашов А.В., Цветков Ю.Н., Чайковский Г.П., Шрейбер Г.К., Эйгелес Р.М., Ясашин В.А. и т. д.

Повышение эффективности работы ШБИ, как правило, является многофакторной задачей и может быть решена путем совершенствования как отдельных компонентов, так и их совокупности.

Успешная работа ШБИ на забое во многом зависит от эффективности разрушающего воздействия его вооружения на породу, долговечности вооружения и качественной работы системы очистки забоя [13, 15, 37].

Вооружение ШБИ – это часть конструкции, непосредственно воздействующая и разрушающая породу забоя, работающая в сложных условиях комплекса разнопеременных нагрузок. От совершенства конструкции вооружения напрямую зависят одни из самых важных технических показателей бурового инструмента - механическая скорость бурения и проходка.

Все виды механического воздействия зубьев вооружения шарошек на породу забоя в целом или по отдельным венцам, кратковременно или постоянно могут быть присущи той или иной модификации ШБИ. Поэтому решение задачи повышения эффективности ШБИ, как правило, связано с уменьшением энергетических затрат при бурении за счет обеспечения соответствия геометрии вооружения условиям работы каждого из венцов шарошек на кольцевых участках забоя и физико-механическим свойствам разбуриваемых горных пород.

Стойкость зубчатого вооружения существенно зависит от величин, направлений и характера воздействия на него, возникающих при бурении нагрузок, а также от целого ряда факторов: физико-механических характеристик материала зубьев, армирующего износостойкого материала, формы зубьев и геометрии армированных зон. Это особенно важно для ШБИ больших диаметров, предназначенного для разбуривания мягких и пород средней твердости, где зубья вооружения имеют максимальные вылеты и соответственно подвержены воздействию наибольших изгибающих нагрузок. Несовершенная форма зубьев, а также нерациональное размещение армированных зон на их рабочих поверхностях способствуют преждевременному износу вооружения за счет образования и распространения микротрещин как в наплавочном материале, так и стальной основе вооружения [16, 41].

Повышению эффективности ШБИ в значительной степени способствует улучшение очистки как самого инструмента, так и призабойной зоны в целом от шлама вследствие применения самоочищающихся шарошек и использованию промывочных узлов, оснащенных гидромониторными насадками различной конфигурации.

Однако во многих случаях конструкции промывочных узлов, а также их размещение в теле бурового инструмента и ориентация относительно вооружения и поверхности забоя не являются оптимальными для данного вида бурового инструмента и конкретных условий бурения. Поэтому во многих случаях работа ШБИ сопровождается образованием в различных участках забоя застойных зон и, как следствие – «засаливанием» зубчатого вооружения шарошек. Это существенно снижает эффективность разрушения породы и транспортировку шлама из призабойной зоны в затрубное пространство, что неминуемо приводит к снижению механической скорости бурения и ресурса работы инструмента.

Совершенствование систем промывки ШБИ особенно важно для шарошечных долот и расширителей больших типоразмеров (от 444,5 мм и более), где конструктивно достаточно сложно приблизить насадки к поверхности забоя без перекрытия межшарошечного пространства. При этом бурение инструментом большого диаметра сопровождается существенным увеличением объемов и размеров частиц разрушенной породы, что так же осложняет эвакуацию шлама из зоны работы инструмента на поверхность. Поэтому разработка новых конструкций промывочных узлов, схем промывки и организации транспортировки шлама из зоны работы данного вида инструмента наиболее актуальны.

Таким образом, создание новых конструкций вооружения шарошек, позволяющих увеличить разрушающую способность зубьев, новых способов организации транспортировки шлама из зоны бурения, а также гидромониторных узлов, предназначенных для разных типоразмеров ШБИ, даст возможность повысить эффективность его работы за счет сокращения времени и уменьшения стоимости бурения нефтяных и газовых скважин.

В связи с этим исследования, направленные на повышение эффективности ШБИ и, как следствие, его конкурентоспособности, являются актуальными.

#### **Степень разработанности темы исследования**

За более чем вековую историю существования ШБИ накоплен огромный теоретический и экспериментальный потенциал, связанный с разработкой, изготовлением и эксплуатацией данного вида бурового инструмента.

Тем не менее анализ существующих на сегодняшний день теоретических исследований свидетельствует о том, что они описывают далеко не все аспекты кинематического взаимодействия элементов зубчатого вооружения шарошек с поверхностью забоя, а конструкции серийного ШБИ не всегда обеспечивают соответствие геометрии вооружения характеру и условиям того или иного способа бурения.

Анализ кинематики и условий работы вооружения ШБИ свидетельствует о том, что у большинства существующего ШБИ со смещенными осями вращения шарошек ориентация зубьев (прямозубого) вооружения не обеспечивает их эффективную работу в условиях повышенного скольжения. А в случае инструмента с несмещенными осями, часто возникает проблема образования зубчатой рейки на поверхности забоя. Устранить эти недостатки, можно путем оснащения шарошек специально ориентированным косозубым вооружением (КЗВ).

В свою очередь, анализ вооружения существующего ШБИ позволяет сделать вывод о том, что большинство конструкций и процессов их изготовления достаточно трудоемки и не в полной мере обеспечивают требуемое качество армированных рабочих поверхностей.

Так же значительное количество теоретических и конструкторских разработок посвящены улучшению очистки как вооружения, так и всей зоны работы инструмента. Однако широко

распространенные на сегодняшний день схемы и отдельные элементы промывочных систем все еще имеют ряд существенных недостатков, таких как: недостаточная надежность крепления и низкое гидравлическое совершенство гидромониторных насадок, их нерациональное расположение на корпусе ШБИ и не способность гарантированно исключить образование застойных зон в различных участках забоя [30, 31].

В связи с этим дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования принципов работы ШБИ, его проектирования, совершенствование процессов его изготовления и создание новых систем промывки ШБИ большого диаметра с КЗВ являются одной из приоритетных задач.

**Цель представленной работы** - повысить эффективность шарошечного бурового инструмента за счет создания новых конструкций косозубого вооружения и гидромониторных узлов, позволяющих увеличить скорость и снизить стоимость проведения буровых работ на основе разработки научно-обоснованных методик проектирования геометрии вооружения и элементов промывочных систем.

#### **Задачи исследования**

- Исследовать процесс кинематического взаимодействия косозубого вооружения ШБИ с забоем при классическом и реактивно-турбинном бурении (РТБ), для того чтобы установить геометрические параметры вооружения, обеспечивающих повышенную эффективность работы ШБИ при бурении пород различной твердости;
- Исследовать процесс силового взаимодействия КЗВ шарошечного бурового инструмента с забоем, для того чтобы установить наиболее эффективную форму зубьев вооружения с целью уменьшения нагрузок, необходимых для успешного разрушения породы и, как следствие, снижению напряжения-деформируемого состояния (НДС) зубьев в процессе работы инструмента;
- Изучить влияние геометрии зубьев вооружения и армированной зоны на прочность вооружения ШБИ в процессе его работы, с целью определения параметров процесса центробежного армирования, в зависимости от геометрии вооружения, а также геометрические параметры зоны армирования, обеспечивающей повышенную стойкость зубьев вооружения шарошек к знакопеременным ударным нагрузкам;
- Исследовать процесс промывки ШБИ с КЗВ, чтобы установить возможность управлять направлением и силой гидравлического потока с помощью изменения геометрических параметров внутреннего поперечного сечения гидромониторных насадок. А также определить влияние вращающегося КЗВ ШБИ на гидравлическую среду забоя;
- Исследовать кинематические характеристики различных венцов шарошек и особенности процесса разрушения забоя, чтобы установить основные факторы, способствующие процессу

рейкообразования, и на этой основе разработать конструкторские решения, предотвращающие образование забойной рейки в течение всего цикла работы инструмента;

- Провести проверку результатов исследований в ходе стендовых и промышленных испытаний и выработать рекомендации по их промышленному использованию.

### **Научная новизна**

1 Установлены основные закономерности процесса перекатывания шарошки бурового инструмента при классическом и реактивно турбинном бурении скважин, позволяющие определять геометрические параметры вооружения, обеспечивающие повышение эффективности работы ШБИ при бурении пород различной твердости.

2 Определено влияние геометрии вооружения на расположение мгновенной оси вращения шарошки ШБИ, позволяющее вычислять координаты ведущего венца и рассчитывать величины проскальзывания ведомых венцов вооружения, а также установлены математические зависимости между отклоняющими и стабилизирующими силами, возникающими при работе инструмента с КЗВ.

3 Установлена закономерность влияния угла наклона КЗВ шарошек на площадь поражения забоя в процессе проскальзывания вооружения, позволяющая ориентировать наклонные зубья с таким расчетом, чтобы обеспечивать максимальное поражение забоя зубьями каждого из венцов для увеличения производительности ШБИ.

4 Установлены основные закономерности процесса силового взаимодействия зубчатого вооружения шарошек с забоем, позволившие установить, что придание зубьям ведомых венцов асимметричной формы способствует не только существенному уменьшению нагрузок, необходимых для успешного разрушения породы, но и снижению напряженно-деформируемого состояния зубьев в процессе работы инструмента.

5 Определены основные параметры процесса центробежного объемного армирования (ЦОА) асимметричного КЗВ, обеспечивающие размещение армирующего компонента в требуемой области рабочей части зуба, с получением аналитического выражения процесса.

6 Установлены основные факторы процесса воздействия вращающегося КЗВ шарошечного бурового инструмента на гидравлическую среду призабойной зоны, а также дано обоснование гидродинамических процессов, происходящих при истечении жидкости из фасонных гидромониторных насадок.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

- Разработаны математические модели: процессов перекатывания шарошки бурового инструмента при классическом и реактивно-турбинном бурении скважин, позволяющие определять геометрические параметры вооружения, обеспечивающие повышенную эффективность работы ШБИ при бурении мягких и средних пород;

- Разработаны новые методики: определения положения мгновенной оси вращения шарошки бурового инструмента, позволяющая определять координаты ведущего венца и рассчитывать величины проскальзывания ведомых венцов вооружения; расчета отклоняющих и стабилизирующих сил, возникающих при работе инструмента с КЗВ; определения основных параметров процесса центробежного объемного армирования асимметричного КЗВ, обеспечивающая размещение армирующего компонента в требуемой области рабочей части зуба с получением аналитического выражения процесса; проектирования новых конструкций стального армированного КЗВ, основанной на расчетах различных прочностных показателей, с целью получения требуемых геометрических размеров;
- Разработана математическая модель силового взаимодействия зубьев вооружения шарошек с деформируемым забоем, позволившая установить, что придание зубьям ведомых венцов асимметричной формы способствует существенному снижению нагрузок, необходимых для успешного разрушения породы забоя;
- Разработаны методики определения физико-механических характеристик (ФМХ) армирующего композиционного материала (КМ), а также проектирования новых конструкций стального армированного КЗВ, основанных на расчетах различных прочностных показателей, с целью получения требуемых геометрических размеров вооружения;
- Разработаны конструктивные схемы КЗВ, обеспечивающие минимальную вероятность отклонения инструмента от заданного направления бурения, за счет уравнивания осевых составляющих сил реакции забоя, действующих на вооружение каждой из шарошек ШБИ;
- Разработаны конструктивные схемы центрального и бокового гидромониторных узлов, а также варианты их размещения в ШБИ;
- Разработано несколько вариантов геометрии КЗВ шарошек, предотвращающих образование забойной реки в течение всего цикла работы инструмента;
- Разработана геометрия КЗВ для шарошечных расширителей, обеспечивающая повышение эффективности их работы;
- Разработаны несколько вариантов КЗВ шарошечных долот для бурения мягких, средних и твердых пород способом РТБ;
- Проведен ряд промышленных испытаний опытных образцов различного ШБИ: трехшарошечных долот П295,3М-ЦГВ, П490С-ЦВ, П393,7С-ЦВ, П490С-ЦВР-1, П490ТЗ-ЦВР-9, шестишарошечных расширителей 6РШ-555М, подтвердивших эффективность использования КЗВ и новых элементов промывочных систем. Некоторые из них были внедрены, другие рекомендованы к внедрению на различных предприятиях нефтегазовой отрасли;
- По результатам проведенной работы получено 33 патента РФ на изобретение.

### **Методы исследования**

При выполнении работы использовались различные методы исследований, такие как: аналитические, теоретические, экспериментально-теоретические, статистические, а также стендовые и промышленные испытания.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Исследован процесс кинематического взаимодействия КЗВ ШБИ с забоем при классическом и РТБ, позволивший установить геометрические параметры вооружения, обеспечивающие повышенную эффективность работы ШБИ при бурении пород различной твердости.
2. Исследован процесс силового взаимодействия КЗВ ШБИ с забоем, позволивший установить, что придание зубьям ведомых венцов асимметричной формы способствует не только существенному уменьшению нагрузок, необходимых для успешного разрушения породы, но и снижению НДС зубьев в процессе работы инструмента. А также разработать конструктивные схемы КЗВ ШБИ, обеспечивающие минимальную вероятность отклонения от заданного направления бурения.
3. Изучено влияние геометрии зубьев вооружения и армированной зоны на прочность вооружения ШБИ в процессе его работы, позволившее определить параметры процесса центробежного армирования в зависимости от геометрии вооружения или решать обратную задачу, при этом обеспечивая необходимое качество армирования. А также геометрические параметры зоны армирования, обеспечивающей повышенную стойкость зубьев вооружения шарошек к знакопеременным ударным нагрузкам.
4. Исследован процесс промывки и осуществлено совершенствование промывочных систем ШБИ с КЗВ, позволившие установить, что с помощью изменения геометрических параметров внутреннего поперечного сечения насадок можно управлять направлением и силой гидравлического потока, без существенных конструктивных изменений как самого узла, так и ШБИ в целом. А также определить влияние вращающегося КЗВ ШБИ на гидравлическую среду забоя.
5. На основе исследований кинематических характеристик различных венцов шарошек и особенностей процесса разрушения забоя были установлены основные факторы, способствующие процессу рейкообразования, позволившие разработать несколько вариантов геометрии КЗВ шарошек как для ведущих, так и ведомых венцов вооружения, предотвращающих образование забойной реки в течение всего цикла работы ШБИ.

### **Личный вклад автора**

Автор лично разработал математические модели: процессов перекачивания шарошки ШБИ при классическом и реактивно-турбинном бурении скважин; силового взаимодействия зубьев вооружения шарошек с деформируемым забоем. Разработал методики: определения положения мгновенной оси вращения шарошки бурового инструмента; расчета отклоняющих и



стабилизирующих сил, возникающих при работе инструмента с КЗВ; определения основных параметров процесса центробежного объемного армирования косозубого асимметричного зубчатого вооружения. Впервые провел исследование влияния вращающегося КЗВ ШБИ на гидравлическую среду призабойной зоны, а также дал обоснование гидродинамических процессов происходящих при истечении жидкости из фасонных гидромониторных насадок.

Автор лично провел математические и физические эксперименты, а также осуществил обработку полученных результатов. Подготовил публикации и оформил патенты РФ на изобретение по материалам проведенной работы. Научные рекомендации автора сформулированы им лично на основе проведенных им исследований.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Основные результаты работы докладывались и демонстрировались, получив одобрение на семинарах, совещаниях и выставках по породоразрушающему буровому инструменту. Среди них можно выделить: Международные выставки: «Нефтегаз – 1998 – 2000»; РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина - конференции «Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России» 1997 – 2007; Доклад на факультете «Горное и нефтегазовое производство» ФГБОУ ВПО Московского государственного университета машиностроения (МАНТИ), по результатам которого книга, изданная по материалам диссертационной работы, была рекомендована для использования в учебном процессе по направлению «Нефтегазовое дело» и «Горное дело»; На научно-технических заседаниях кафедр «Технология газонефтяного и нефтехимического машиностроения», «Стандартизация, сертификация и управление качеством производства нефтегазового оборудования» в РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в период с 2010 г. по настоящее время.

### **Соответствие темы диссертации паспорту специальности**

*Пункт 1. Разработка научных и методологических основ (методик) проектирования новых конструкций* стального армированного косозубого вооружения, основанных на расчетах различных прочностных показателей, с целью получения требуемых геометрических параметров вооружения.

*Пункт 3. Теоретические и экспериментальные исследования гидродинамических процессов*, происходящих при истечении жидкости из фасонных гидромониторных насадок, а также влияния вращающихся зубьев вооружения шарошечного бурового инструмента на гидравлическую среду призабойной зоны. **Исследование параметров, определяющих положение мгновенной оси вращения шарошки бурового инструмента, а также отклоняющих и стабилизирующих сил**, возникающих при работе инструмента с косозубым вооружением.

*Пункт 5. Разработка научных основ по математическому моделированию процессов перекатывания шарошки бурового инструмента* при классическом и реактивно турбинном

бурении скважин, позволяющему определять геометрические параметры вооружения и гидродинамических процессов, происходящих при истечении жидкости из фасонных гидромониторных насадок, **обеспечивающих повышение эффективности (производительности) работы шарошечного инструмента** при бурении пород различной твердости.

*Пункт 6. Исследование технологического процесса* центробежного объемного армирования косозубого асимметричного зубчатого вооружения с целью обеспечения гарантированного размещения армирующего компонента в требуемой области рабочей части зуба с получением аналитических выражений. **Исследование кинематики шарошечных буровых долот** при классическом и реактивно-турбинном бурении, позволившее установить **траектории движения зубьев** вооружения шарошек, направления и **величины скоростей вращения и проскальзывания вооружения** в каждой точке забоя.

Таким образом, диссертация соответствует по области исследований (пункты 1, 3, 5, 6) паспорту специальности 05.02.13 - «Машины, агрегаты и процессы (в нефтегазовой отрасли)».

#### **Публикации**

Основные материалы работы опубликованы в 97 печатных трудах, из них: 62 работы в рецензируемых журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ, 33 патента РФ на изобретение, 2 монографии.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 6 глав, основных выводов, списка литературы, включающего 175 наименований работ и приложений. Работа изложена на 433 страницах текста, включает 184 рисунка и 14 таблиц.

## ГЛАВА 1.

### АНАЛИЗ РАБОТЫ, КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА

При работе ШБИ его шарошки совершают сложное вращательное движение, заключающееся в том, что каждая из них, вращаясь вокруг своей собственной оси, одновременно перемещается и вокруг оси вращения долота или корпуса инструмента. При этом ШБИ под действием веса буровой колонны продвигается вниз, одновременно совершая возвратно-поступательные колебания, и воспринимает существенные воздействия динамических нагрузок. Эта особенность эксплуатации шарошечного бурового инструмента предъявляет жесткие требования как к его конструкции, так и технологии изготовления.

#### 1.1 Анализ процесса кинематического взаимодействия и условий работы вооружения шарошечного бурового инструмента

Известно, что конструкции ШБИ, предназначенные для бурения твердых, средних и мягких пород сильно отличаются друг от друга. Одной из основных отличительных особенностей является наличие или отсутствие проскальзывания зубьев вооружения по забою, определяемое как геометрическими параметрами шарошек, так и их пространственной ориентацией относительно оси вращения долота. От соотношения величины качения и скольжения зубьев по забою зависит характер разрушения породы, изменяющийся от дробяще-скалывающего для твердых пород до ударно-режущего для мягких.

Как правило, шарошечные буровые долота (ШБД) для мягких и средних пород проектируются так, чтобы при вращении инструмента шарошки перемещались по поверхности забоя с одновременным проскальзыванием. С целью увеличения степени проскальзывания зубьев вооружения по забою у долот данных типов оси вращения шарошек смещают или разворачивают как по, так и против направления вращения долота. Принято считать, что в первом случае смещение имеет положительное значение, а во втором - отрицательное. Величина смещения  $k$  или угол разворота  $\beta$  задаются в зависимости от типа и размера долота (рисунок 1.1).

Рассмотрим характер разрушения породы на забое скважины долотом с одноконусными шарошками, вершины которых находятся на оси скважины. Радиус  $R$  скважины, образуемый этим долотом, равен длине образующей конуса шарошки  $OB$  (рисунок 1.2).

В этом случае порода разрушается в основном за счет ее дробления зубьями вооружения шарошек в результате силового и динамического воздействия их на забой скважины при

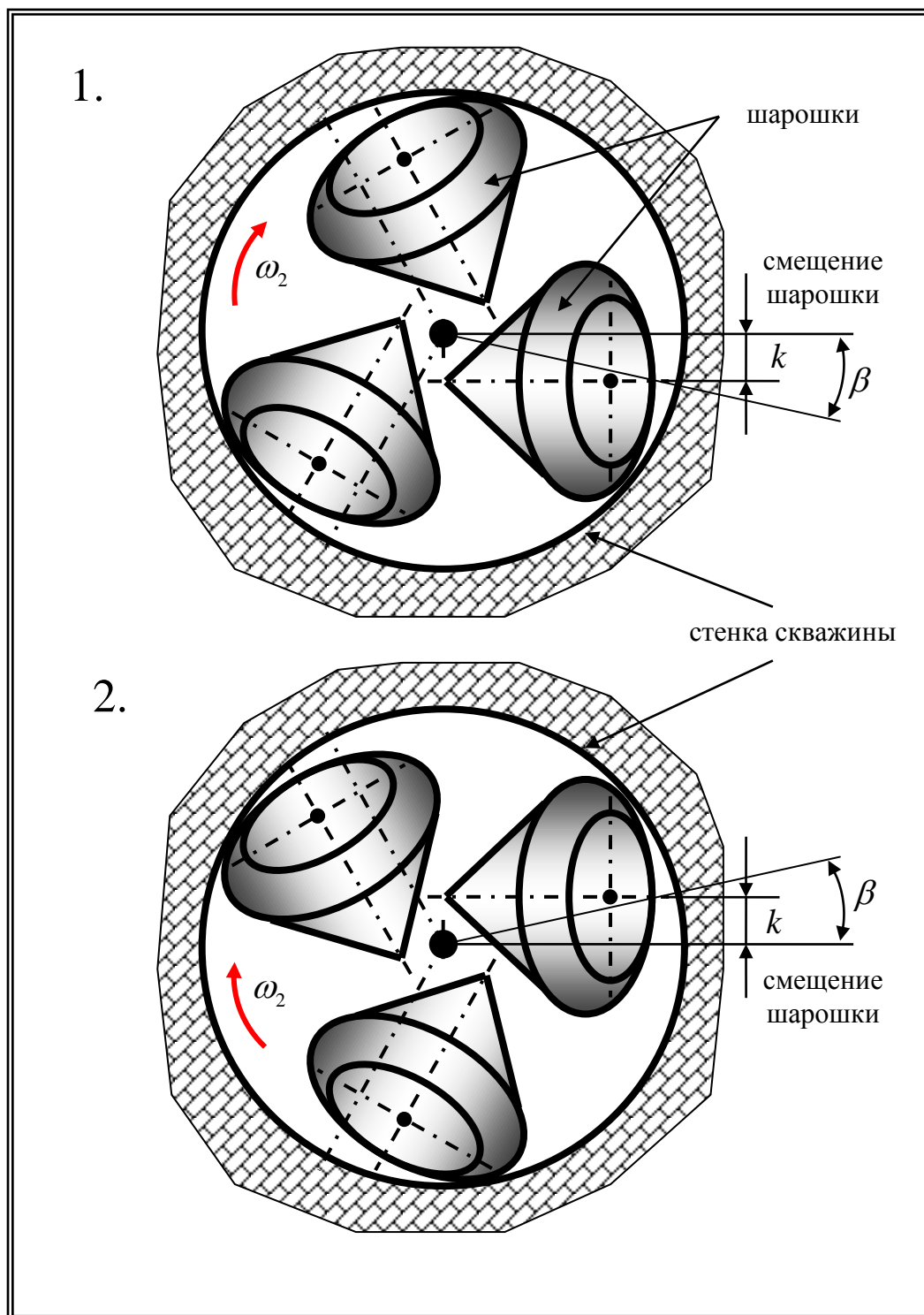


Рисунок 1.1 - Схема смещения осей шарошек долота

1 - по направлению вращения долота (положительное смещение);

2 - против вращения долота (отрицательное смещение)

перекатывании. При этом будет происходить и частичное скалывание породы вследствие незначительного проскальзывания зубьев по забою.

Движение шарошки в любой момент времени складывается из двух основных вращений: переносного - вокруг оси долота и относительного - вокруг оси шарошки.

Абсолютная скорость точки  $m$ , определяется как геометрическая сумма ее переносной и относительной скоростей, направленных по одной прямой (рисунок 1.2).

Величина переносной скорости точки  $m$  равна [50]:

$$v_2 = mo \cdot \omega_2. \quad (1.1)$$

где  $mo$  - расстояние от оси долота до точки  $m$ ;  $\omega_2$  - угловая скорость долота.

Величина относительной скорости точки  $m$  равна

$$v_{1,2} = mn * \omega_{1,2}. \quad (1.2)$$

где  $mn$  - радиус шарошки в точке  $m$ ;  $\omega_{1,2}$  - угловая скорость шарошки.

В данном случае относительная скорость направлена в сторону, противоположную направлению переносной скорости. Скорости, направленные по вращению долота, считаются положительными, а против вращения долота - отрицательными.

Скорость скольжения точки  $m$  определяется как:

$$v_{СК} = \vec{v}_2 + \vec{v}_{1,2} = v_2 + v_{1,2} = mo \cdot \omega_2 - mn \cdot \omega_{1,2}. \quad (1.3)$$

В зависимости от абсолютных значений переносной и относительной скоростей скорость скольжения может быть положительной или отрицательной. В первом случае будет работать (скалывать породу) передняя грань зуба шарошки, во втором - задняя. В первом случае нескользящая точка находится ниже образующей конуса шарошки, а во втором - выше (в теле шарошки).

На (рисунок 1.2) показан вариант, когда  $v_2 > v_{1,2}$ . В этом случае скорость скольжения положительная и основную работу по скалыванию породы осуществляет передняя грань зуба шарошки, а нескользящая точка находится вне тела шарошки, что характерно для работы шарошечных долот.

Отношение скорости скольжения к скорости вращения долота определяет степень приспособленности долота к разрушению породы путем скалывания:

$$\frac{v_{СК}}{v_2} = \mu_{СК}. \quad (1.4)$$

где  $\mu_{СК}$  - показатель скольжения.

Отношение скорости качения шарошки (относительная скорость) к скорости вращения инструмента определяет способность долота разрушать породу дроблением [50]

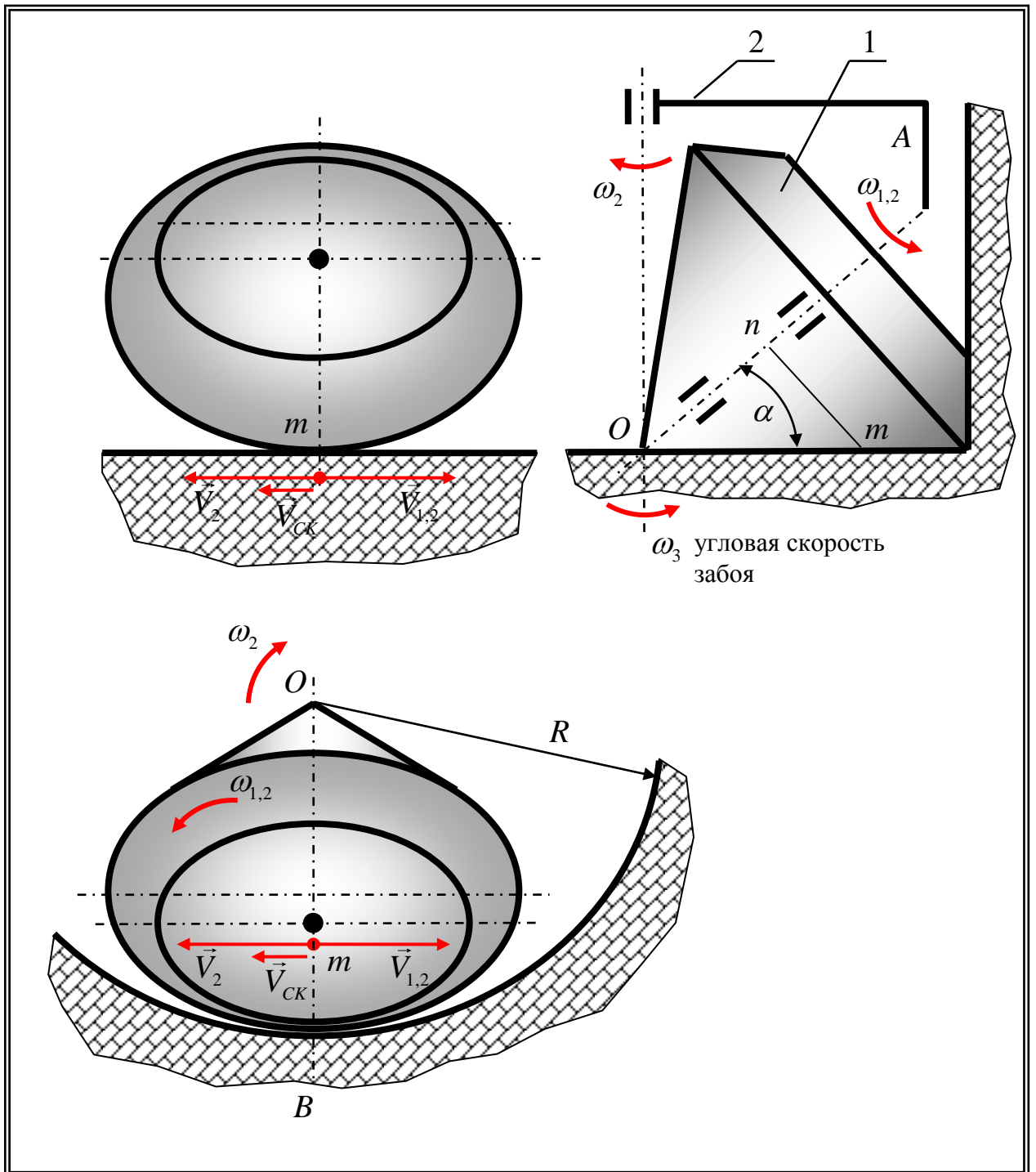


Рисунок 1.2 - Схема работы на забое долота с одноконусными шарошками

1 - вращение вокруг оси шарошки; 2 - вращение вокруг оси долота

$$\frac{v_{1;2}}{v_2} = \mu_K. \quad (1.5)$$

где

$\mu_K$  - показатель качения. Очевидно, что  $\mu_{СК} + \mu_K = 1$  (при  $v_2 > v_{1;2}$ ).

Долото со смещенными в плане осями вращения шарошек образует скважину радиусом  $R$ , равным расстоянию от оси вращения инструмента до самой удаленной точки вооружения  $B'$ . Эта точка не лежит на забое скважины, и ее положение определяется графически (рисунок 1.3). Скважина расширяется и калибруется по криволинейной траектории, описываемой точкой  $B'$  при вращении шарошки на участке от стенки скважины до ее забоя.

При использовании долот с положительным смещением в плане осей вращения (рисунок 1.3) разрушение породы при бурении в данной части скважины и в местах расширения и калибрования будет такое же, как и у долот с несмещенными шарошками. Смещение осей повышает скольжение зубьев по забою, вследствие чего увеличивается разрушение породы за счет скалывания. Скважина расширяется и калибруется зубьями долота, расположенными на периферийном ряду. Эти же зубья участвуют и в разрушении забоя, так что процесс разрушения и калибрования скважины происходит одновременно с углублением ее забоя. Суммарная нормальная реакция стенки скважины направлена таким образом, что ее момент относительно оси вращения шарошки действует по ее вращению.

В долотах со смещенными осями вращения переносная скорость зубьев не лежит в одной плоскости с их относительной скоростью (рисунок 1.3.).

Разложим переносную скорость  $v_2$  в точке  $m$  по направлению относительной скорости и направлению, перпендикулярному относительной скорости. Проекция переносной скорости на направление относительной скорости будет:

$$v'_2 = v_2 \cdot \cos \theta = m\omega \cdot \omega_2 \cos \theta = mD\omega_{1;2}. \quad (1.6)$$

где  $mD$  - расстояние от точки  $m$  до вершины шарошки;

$\theta$  - угол в плане между радиусом  $mo$  и образующей шарошки  $BD$ .

Проекция переносной скорости на направление, перпендикулярное относительной скорости:

$$v''_2 = v_2 \cdot \sin \theta = m\omega \cdot \omega_2 \cdot \sin \theta = k\omega_2. \quad (1.7)$$

где  $k$  - смещение осей в плане.

Геометрическая сумма относительной скорости  $v_{1;2}$  и переносной скорости  $v'_2$  определит скорость скольжения точки  $m$  по направлению относительной скорости, т. е. по направлению, перпендикулярному образующей конуса шарошки.

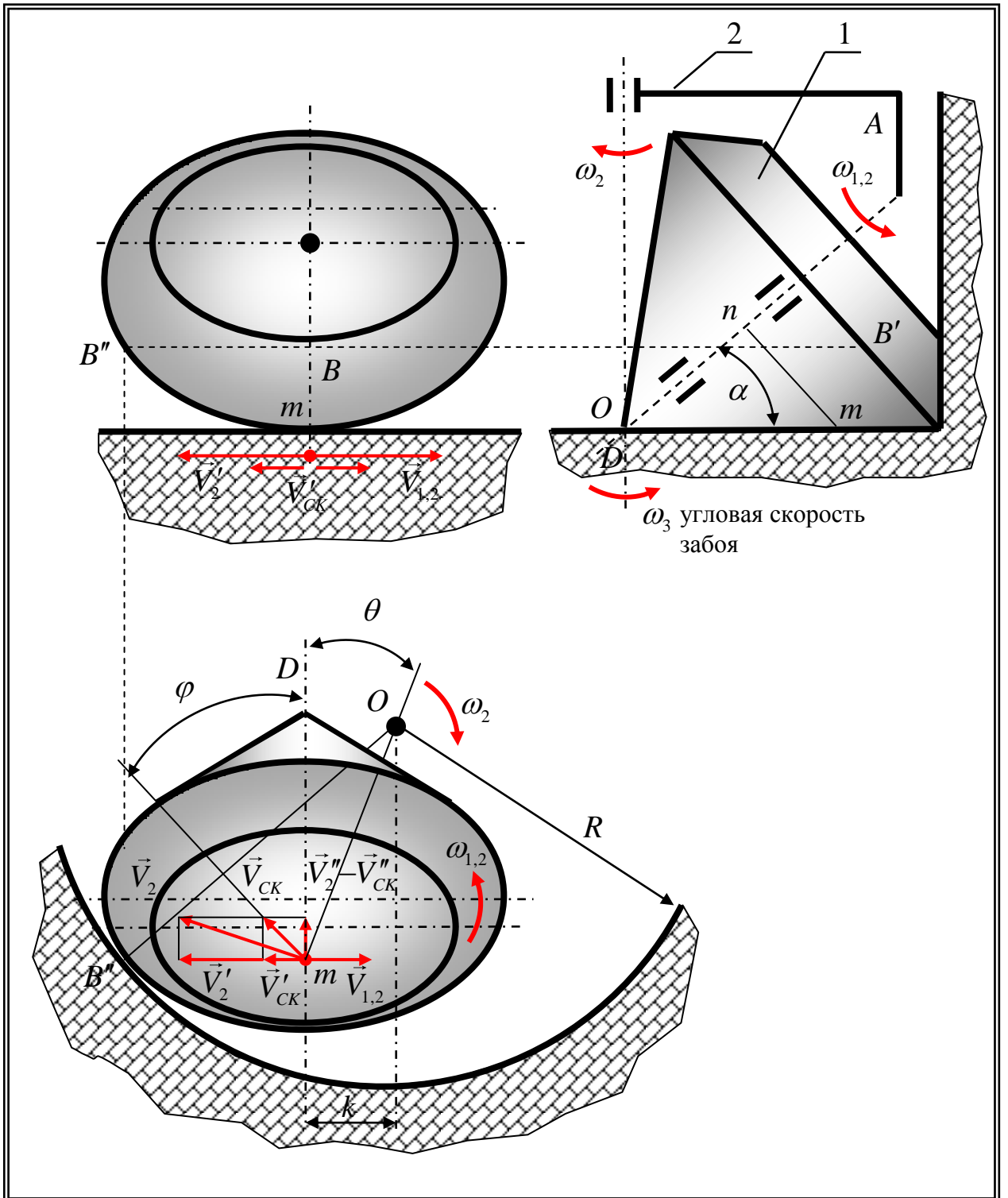


Рисунок 1.3 - Схема работы долота с положительным смещением осей шарошек

1 - вращение вокруг оси шарошки; 2 - вращение вокруг оси долота



Эта скорость поперечного скольжения

$$v'_{CK} = v'_2 + v_{1,2}. \quad (1.8)$$

Так как  $v_2$  имеет положительное направление, а  $v_{1,2}$  отрицательное то:

$$v'_{CK} = v_2 + v_{1,2} = mD\omega_2 - mn\omega_{1,2}. \quad (1.9)$$

Направление скорости поперечного скольжения зависит от абсолютных величин переносной  $v'_2$  и относительной  $v_{1,2}$  скоростей.

Составляющая переносной скорости  $v''_2$  представляет скорость скольжения точки  $m$  по направлению контактирующей образующей конуса шарошки. Эта скорость продольного скольжения  $v''_{CK}$ .

Суммарная скорость скольжения точки  $m$  по забою равна:

$$v_{CK} = \sqrt{(v'_{CK})^2 + (v''_{CK})^2}. \quad (1.10)$$

Угол между суммарной скоростью скольжения и образующей шарошки равен [50]

$$\psi = \arctg \frac{v'_{CK}}{v''_{CK}}. \quad (1.11)$$

Скорость продольного скольжения  $v''_{CK}$  при положительном смещении направлена к вершине конуса шарошки. При этом суммарная скорость скольжения  $v_{CK}$  отклонена на угол  $\psi$  от направления скорости продольного скольжения.

Если  $v'_2 > v_{1,2}$  то  $v_{CK}$  направлена в сторону переносной скорости.

Если  $v'_2 < v_{1,2}$ , то  $v_{CK}$  направлена в сторону относительной скорости.

На (рисунок 1.3) показан случай, когда  $v'_2 > v_2$  и скорость  $v_{CK}$  направлена в сторону переносной скорости. Показатели скольжения и качения здесь такие же, как и в предыдущем случае.

Характер разрушения породы забоя долотом с отрицательным смещением осей (рисунок 1.4) отличается от ранее рассмотренных вариантов. Порода на забое разрушается, как и прежде, за счет дробления и повышенного скольжения. Однако скважина расширяется и калибруется исключительно фрезерованием забоя зубьями обратных конусов шарошек. В данном случае суммарная нормальная реакция стенки скважины направлена так, что ее момент относительно оси шарошки действует против вращения шарошки.

У долот, имеющих отрицательное смещение осей шарошек, скорость скольжения в продольном направлении  $v''_{CK}$  равна переносной скорости  $v''_2$  и направлена от вершины конуса шарошки к основанию (рисунок 1.4). Суммарная скорость скольжения в ту или иную сторону, как

и ранее, зависит от величины скоростей  $\vec{v}'_2$  и  $\vec{v}'_{1,2}$ . На (рисунок 1.4) показан случай, когда  $\vec{v}'_2 > \vec{v}'_{1,2}$  и скорость  $v_{СК}$  отклоняется в сторону переносной скорости.

У долот с несмещенными осями вращения шарошек скорость скольжения направлена в сторону вращения долота и по длине образующей конуса шарошки изменяется по линейному закону, возрастая от вершины к основанию, а у долот со смещенными осями вращения шарошек скорость скольжения изменяется по величине и направлению [8, 36, 88].

При положительном смещении скорость скольжения направлена к вершине шарошки, отклоняясь на угол  $\psi$  от образующей. При отрицательном смещении скорость скольжения направлена к основанию конуса шарошки, тоже отклоняясь от образующей на угол  $\psi$ .

Таким образом, у подавляющего большинства существующих буровых долот со смещенными осями вращения шарошек ориентация зубьев прямозубого вооружения (ПЗВ) не обеспечивает их эффективную работу в условиях повышенного скольжения.

## **1.2 Конструкции и технологические процессы изготовления вооружения шарошечного бурового инструмента**

Анализ конструкций и технологий изготовления ШБИ позволяет выявить «слабые места» существующих технических решений и наметить пути их устранения с целью повышения надежности инструмента и увеличения наиболее важных показателей бурения: механической скорости и проходки на инструмент [15, 102].

В настоящее время при бурении скважин на нефть и газ широко используется шарошечный буровой инструмент со стальным поверхностно-армированным зубчатым вооружением. Конструкции данного вида бурового инструмента отличаются друг от друга: размером, геометрией вооружения, способом получения заготовок шарошек, конструкциями подшипниковых узлов и т. д.

В зависимости от свойств горных пород ШБИ по кинематическим характеристикам можно условно разделить на две группы, обусловленные характером взаимодействия зубьев их вооружения с породой. Это долота ударного-дробящего и ударно-режущего действия.

Особенностями долот ударного-дробящего действия, предназначенных для бурения твердых пород являются минимальное проскальзывание зубьев при перекачивании шарошек по забою и полное отсутствие фрезерующего действия по стенке скважины зубьями периферийных калибрующих венцов. Оси шарошек этих долот пересекаются с осью вращения долота.

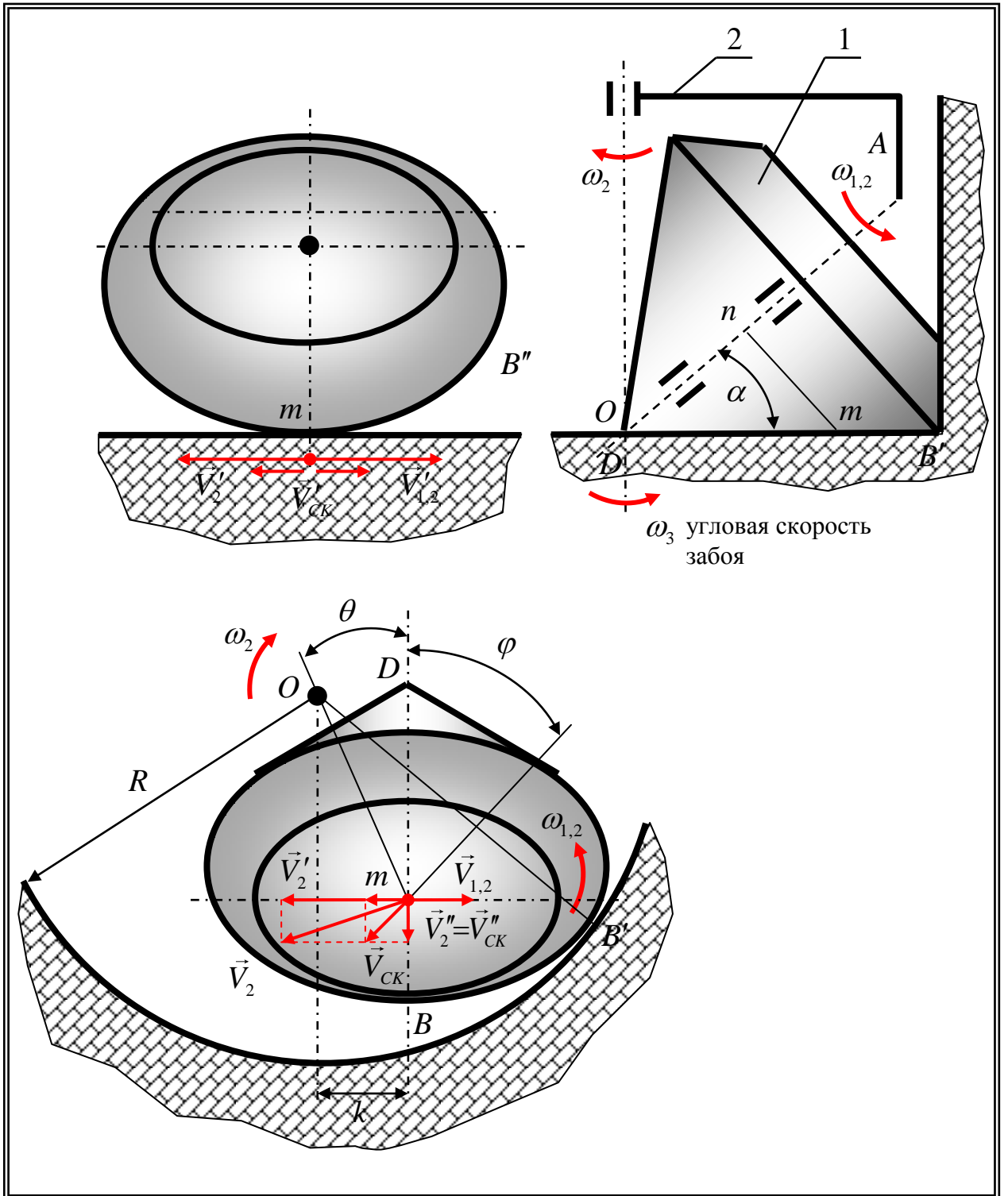


Рисунок 1.4 - Схема работы долота с отрицательным смещением осей шарошек  
 1 - вращение относительно оси шарошки; 2 - вращение относительно оси долота

Особенностью долот ударно-режущего действия, созданных для разбуривания мягких и средних пород, является наличие существенного скольжения зубьев вооружения при перемещении шарошек по поверхности забоя, а также при образовании стенки скважины. Оси шарошек этих долот не пересекаются с осью долота. Величина смещения доходит до 8-10 мм и в большей степени определяет величину скольжения зубьев шарошек по забою. При этом используется так называемое «самоочищающееся» вооружение шарошек.

С позиции механики разрушения упругопластичных и пластичных горных пород, долота этой группы должны осуществлять режущее воздействие зубьев вооружения на породу забоя. Как правило, это достигается за счет смещения осей шарошек в плане и большого вылета их вершин относительно оси вращения долота. Вследствие смещения осей шарошек в процессе вращения долота создаются условия для дополнительного скольжения зубьев в продольном направлении, которое, суммируясь с другими факторами, увеличивает общую величину скольжения. Величина скорости скольжения напрямую зависит от величины смещения осей шарошек. Увеличение скорости скольжения вызывает соответствующее увеличение и скорости разрушения пластичной породы.

Более того, известно, что максимальное сопротивление горные породы оказывают при их сжатии. Например, прочность гранита на сжатие приблизительно в одиннадцать раз больше его прочности на сдвиг [13]. Относительная сопротивляемость горных пород различным видам разрушения приведена в (таблице 1.1).

Таблица 1.1 – Относительная сопротивляемость горных пород различным видам разрушения

Горная порода	Относительная прочность, %			
	сжатие	сдвиг	изгиб	растяжение
граниты	100	9	8	2-4
песчаники	100	10-12	6-8	2-5
известняки	100	15	8-10	4-10

Из приведенной таблицы следует, что прочность горных пород в зависимости от вида деформации подчиняется следующему неравенству:

$$\sigma_c \gg \tau_c > \sigma_l > \sigma_p. \quad (1.12)$$

где  $\sigma_c, \tau_c, \sigma_l, \sigma_p$  - напряжения сжатия, сдвига, изгиба, растяжения, соответственно.

Это свидетельствует о том, что раздавить породу на порядок труднее, чем сдвинуть ее в каком-либо направлении. В связи с этим большим резервом в повышении механической скорости бурения ШБИ, является разработка зубчатого вооружения, обеспечивающего при его воздействии на породу забоя возникновение в ней преобладающих деформаций сдвига, а не сжатия.

На (рисунок 1.5) приведены экспериментально полученные зависимости скорости проходки и крутящего момента на долоте от величины смещения осей шарошек в плане при разных нагрузках на долото  $G_1 > G_2$  для незатупляющегося вооружения испытываемых долот [48]. Из графиков видно, что скорость бурения пластичных, небразивных пород (глина, мрамор) тем больше, чем больше смещение осей шарошек (интервал 0-10 мм). С увеличением смещения увеличивается крутящий момент, требуемый для разрушения породы забоя.

Если же по мере углубления долота происходит износ вооружения, скорость бурения падает тем интенсивнее, чем больше смещение осей шарошек в плане. Это наглядно иллюстрируется (рисунок 1.6), где при большей начальной скорости бурения долотом со смещением осей шарошек 2 мм средняя скорость и проходка меньше, чем у долота без смещения.

При наличии в процессе работы долота износа и притупления зубьев выигрыша в средней скорости проходки при смещении осей шарошек может и не быть, а проходка на долото при бурении крепких и абразивных пород может даже уменьшаться, ведь наибольший эффект разрушения такой породы достигается ударным воздействием. Излишнее скольжение в данных условиях может вызывать только повышенный износ вооружения. Поэтому максимальная величина смещения осей шарошек в плане рекомендуется только для долот для бурения мягких и рыхлых пород, не дающих хрупкого разрушения (такие, как мягкие глины, слабоцементированные пески, ракушечники, мергели и др.).

Под максимальным смещением понимается смещение, после которого дальнейшее его увеличение не приводит к заметному росту скорости проходки (рисунок 1.5).

Чтобы придать зубьям долота большие скольжения, направленные как вдоль, так и поперек образующих конусов, при проектировании долот, для бурения мягких пород, вместе со смещением осей вращения шарошек предусматривают максимальный вылет вершин шарошек за ось вращения долота и наибольшую длину венцов, ориентировочно равную удвоенной величине смещения -  $2e$ .

Благодаря смещению улучшается перекрытие забоя зубьями шарошек за счет уменьшения зазоров между сопрягаемыми венцами, что приводит к необходимости увеличения длины зубьев, входящих в межвенцовые канавки.

Максимальный угол наклона цапф лап относительно оси долота позволяет вписать в габарит скважины шарошки больших размеров, а их многоконусный контур образует забой выпукло-вогнутой формы. Диаметр периферийных венцов шарошек, составляющий при  $\varphi = 57^{\circ}30'$  не менее  $0,63 \div 0,66$  от диаметра скважины, обеспечивает при этом необходимый условный угол калибровки скважины  $\xi = 8^{\circ} \div 10^{\circ}$ .

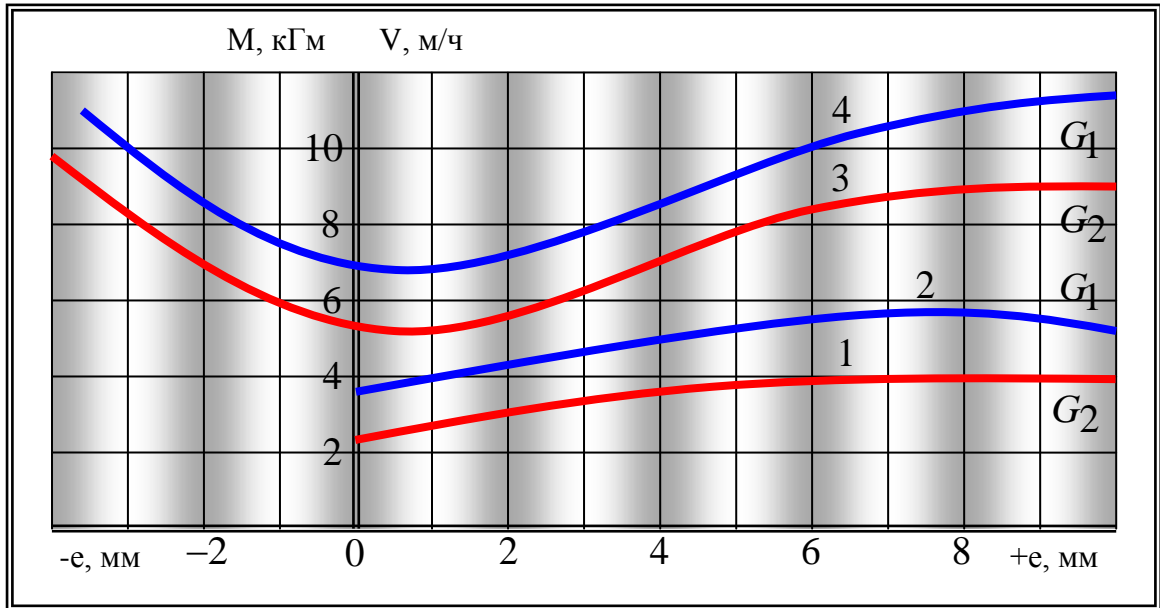


Рисунок 1.5 – Зависимость скорости проходки и момента на долоте от величины смещений осей шарошек при различных нагрузках на долото  
1 и 2 - скорость проходки; 3 и 4 - момент

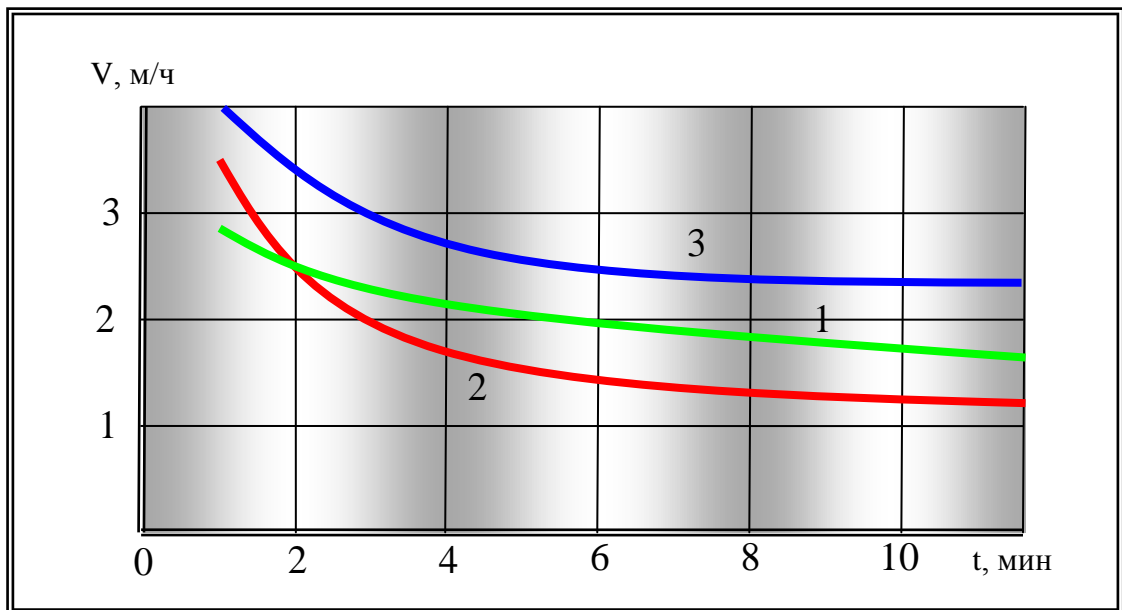


Рисунок 1.6 – График изменения механической скорости проходки для долот с пересекающимися и с перекрещивающимися (смещенными) осями  
1 - долото без смещения осей шарошек; 2 - долото со смещенными осями шарошек (на 2 мм);  
3 - долото с отрицательным смещением осей шарошек в плане

При бурении мягких пород глубина образуемой каждым зубом лунки никогда не превосходит величины его внедрения. Поэтому необходимым условием успешного бурения мягких пород должно быть не только скольжение зубьев по забою, но и обеспечение их внедрения на максимально возможную глубину. Необходимость большого углубления зубьев в породу предопределяет вполне определенное минимальное их количество на шарошках.

В долотах, предназначенных для бурения мягких пород «М» (согласно ГОСТ 20692-2003. Долота шарошечные. Технические условия), зубья делаются с большим вылетом, а шаг задается таким образом, чтобы было обеспечено беспрепятственное внедрение находящегося в контакте с породой зуба на возможно большую глубину.

Для долот, предназначенных для бурения средних пород «С», перемежающихся твердыми и абразивными (песчаниками), величина смещения осей шарошек в плане принимается минимальной, но достаточной для получения высоких скоростей бурения в глинистых породах. Для той же цели угол наклона цапфы  $\varphi$  и угол основного конуса шарошки  $2\beta$  могут быть приняты близкими к долоту типа «М»; однако вылет вершины за ось долота и условный угол калибровки скважины должны быть несколько меньшими. С другой стороны, долотами для бурения средних пород должно быть обеспечено эффективное разрушения пропластков пород значительной твердости и абразивности, поэтому зубья делаются более короткими, нарезаются с меньшим шагом и большим углом заострения.

Промежуточными, между указанными ранее типами «М» и «С», являются долота «МС», предназначенные для бурения мягких и средних пород (плотные глины с частыми прослоями мергелей, песчаники, соли, гипс и т. д.). Учитывая, что эти долота должны работать в пропластках пород повышенной твердости (песчаниках), для них принято смещение шарошек, аналогичное долотам типа «С». Для придания лучших скоростных показателей бурения мягких, пластичных пород, углы наклона цапф и углы конусов шарошек, а также условный угол калибровки скважины делаются близкими либо одинаковыми с долотами типа «М», а длину зубьев и их количество выбирают промежуточными между долотами типов «М» и «С» [48].

Соотношение длин зубьев (ширина венцов) у долот типов «С», «МС» и «М» принимают как 1:1,3:1,5.

В настоящее время существует большое количество конструкций ШБИ, оснащенных КЗВ, тем не менее лишь единицы нашли свое воплощение в серийно выпускаемом ШБИ. Главной причиной такой невостребованности, вероятно, является сложность нахождения баланса между новыми конструктивными решениями геометрии вооружения и технологическими аспектами его изготовления [100].

Наиболее распространенными вариантами КЗВ являются конструкции, представленные на (рисунок 1.8).

Как правило, конструкции КЗВ представляют собой различные сочетания прямых и наклонных зубьев, одно- и разнонаправленных наклонных зубьев. При этом эти сочетания могут использоваться как в рамках одного из венцов отдельной шарошки, так и на различных венцах каждой из шарошек ШБИ.

Рассмотрим более подробно наиболее оригинальные конструкции КЗВ и их конструктивные особенности. Одна из таких конструкций КЗВ позволяет снизить энергоемкость процесса разрушения породы забоя и тем самым повысить эффективность работы ШБИ (рисунок 1.7.3). Основной конструктивной особенностью данной геометрии вооружения шарошек 1, является то, что они оснащены зубьями 2, имеющими прямоугольные площадки притупления 3, диагонали 4 которых находятся строго в одной плоскости 6 с осью вращения шарошки 5. Это позволяет для заданных величин, таких как коэффициент перекатывания и площадь контакта вооружения с забоем, создавать зубчатое вооружение с минимальной высотой и максимальным притуплением. Такие зубья позволяют создавать зоны с предельным напряженным состоянием в породе забоя на большей глубине, так как оно напрямую зависит от величины притупления зуба. Более того, данная геометрия вооружения позволяет усилить эффект сложения волн напряжений, который возникает в горной породе при одновременном воздействии на нее зубьев вооружения разных венцов. Это позволяет увеличить объем и снизить энергоемкость процесса лункообразования на поверхности забоя и повысить эффективность разрушения горной породы [44, 91].

Интересное конструкторское решение предложено в ШБИ, предназначенном для бурения мягких и средних пород (рисунок 1.9). Его шарошки оснащены асимметричными зубьями, выполненными в виде резцов с уклоном по направлению вращения инструмента. Шаг зубьев задается с таким расчетом, чтобы в момент врезания в поверхность забоя первого, по отношению к направлению вращения инструмента, зуба последующий оказывал препятствующее повороту шарошки воздействие, тем самым способствуя более глубокому внедрению первого зуба в породу. На (рисунок 1.9) представлена схема данного конструкторского решения, где  $P$  - усилие, создаваемое крутящим моментом на долоте;  $aP$  – момент относительно мгновенной оси вращения  $O$  шарошки;  $t_x$  – шаг зубьев;  $Q$  – осевое усилие;  $P_2 + P_1 = P$  - усилие резания. При этом силы  $P$  и  $P_1$  образуют пару с моментом  $aP$ .

Представленная конструкция дает возможность значительно увеличить режущую составляющую в работе вооружения ШБИ, однако существенное увеличение шага и высокая асимметрия зубьев приводят к увеличению вибраций и нестабильной работе инструмента.

На (рисунок 1.9.1) представлена еще одна конструкция КЗВ ШБИ. Из теории и практики бурения известно, что механическая скорость бурения существенно зависит от площади опор



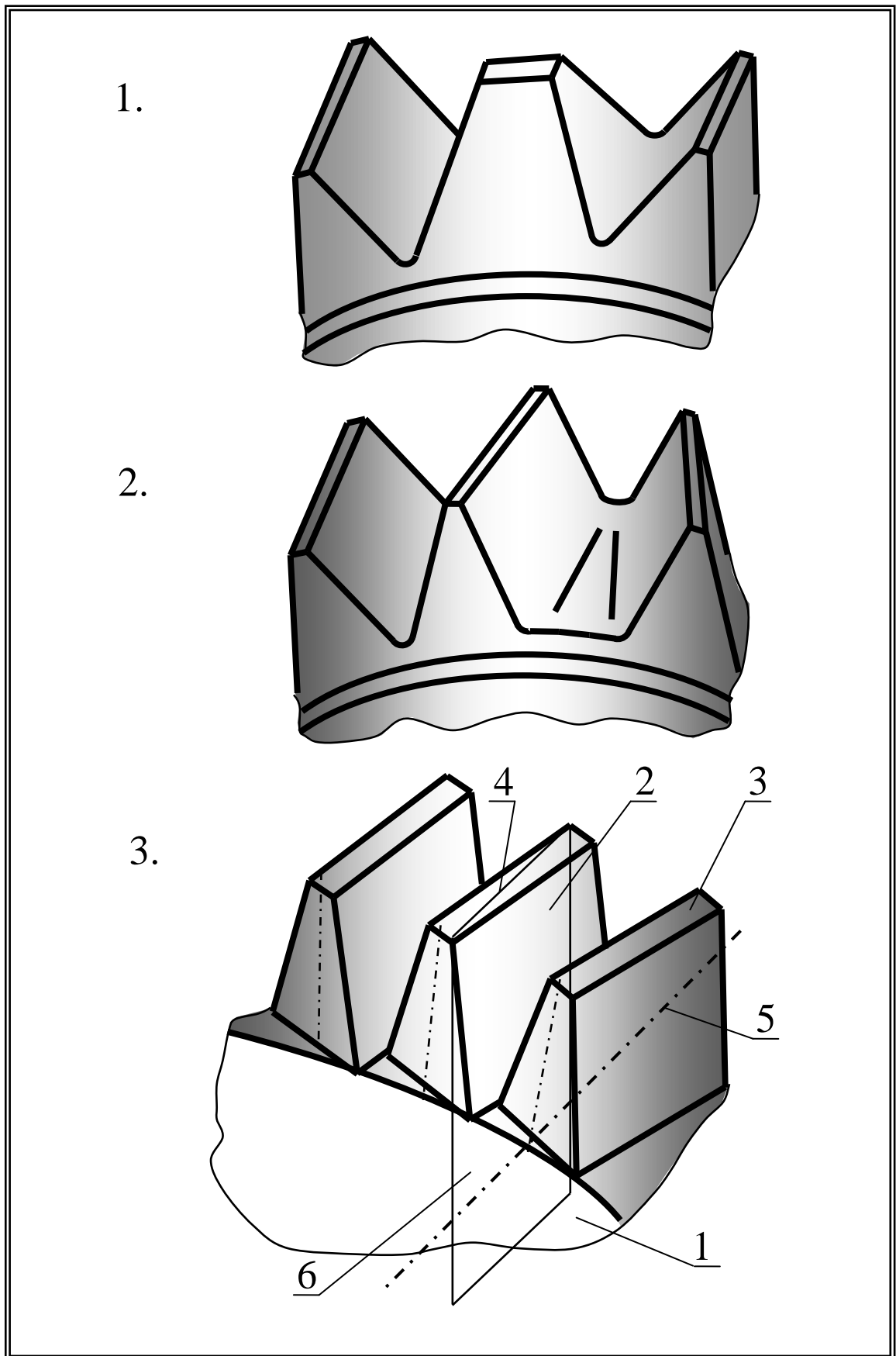


Рисунок 1.7 – Варианты исполнения косозубого вооружения

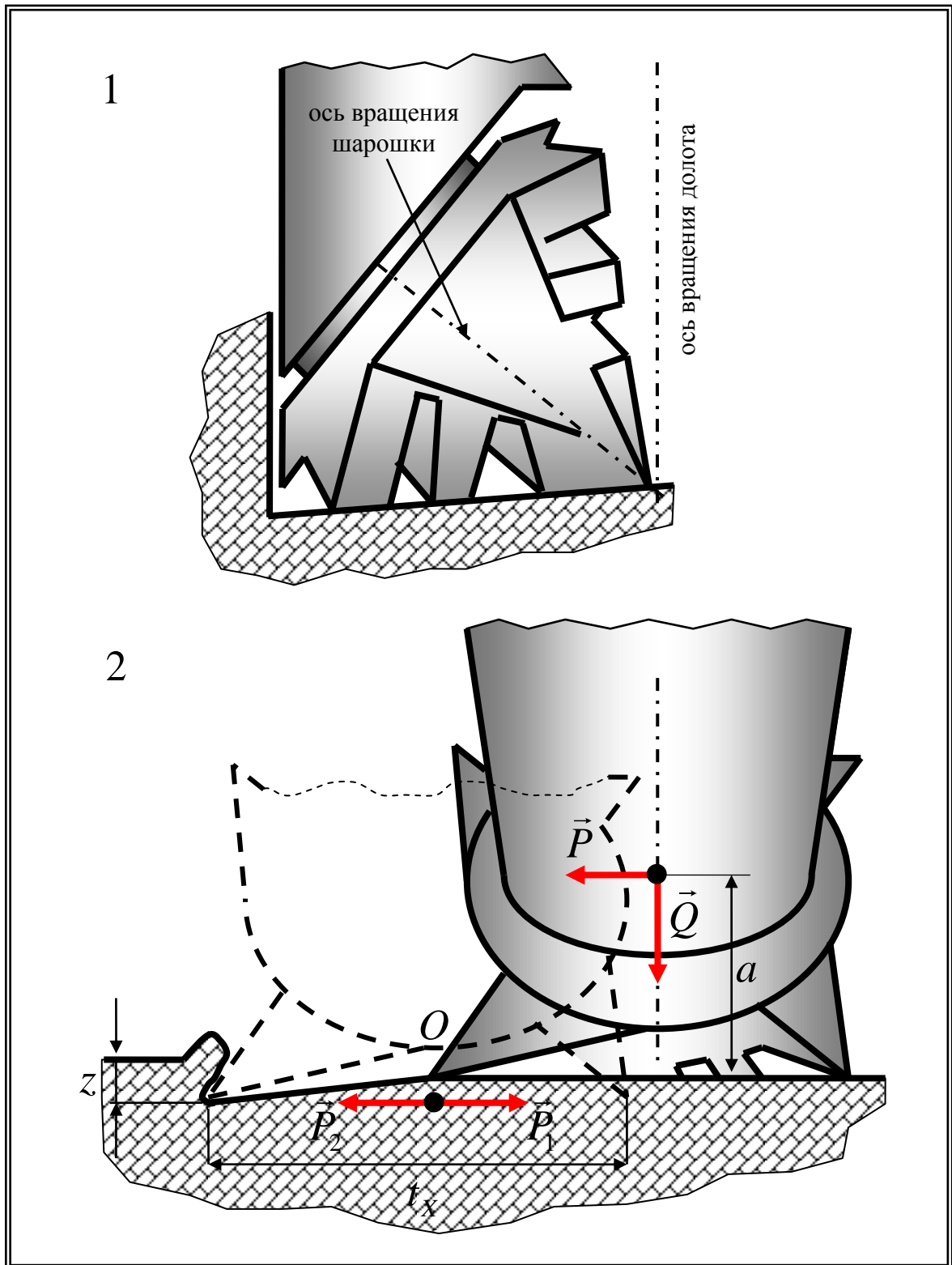


Рисунок 1.8 – Принципиальная схема шарошечного бурового долота с асимметричным зубчатым вооружением

1 - вид со стороны межшарошечного пространства; 2 - вид со стороны спинки лапы

ной поверхности, образованной между площадками притупления и кромками зубьев вооружения и разрушаемой породой в процессе работы ШБИ. Работа прямозубого вооружения шарошек ШБИ характеризуется постепенным уменьшением величины вылета зубьев ввиду их износа и соответствующим увеличением площадей площадок притупления зубьев. Это приводит к уменьшению удельного давления, передаваемого зубьями на забой, и, как следствие, снижению механической скорости бурения.

С целью снижения интенсивности этого негативного процесса данное долото оснащено шарошками, вооружение которых, представляет собой винтовые зубья, нарезанные сплошной спиралью и переменным шагом (рисунок 1.9.1). При вращении ШБИ и, как следствие, его шарошек узкие и короткие участки спиралеобразных зубьев в местах их контакта с забоем создают высокие удельные давления, при этом происходит безударное, непрерывное и последовательное разрушение породы. За счет постоянного и последовательного перемещения пятна контакта зубьев с забоем по спирали удельное давление будет сохраняться значительно большее время, чем это происходит при работе прямозубого вооружения. А также при одновременной работе нескольких винтовых нарезов, за счет их большей длины, износ вооружения будет меньше, а, следовательно, зубья будут дольше сохранять свои изначальные геометрические размеры. Для обеспечения равномерного разрушения забоя по всей его площади зубья на всех шарошках нарезаются с разными направлениями подъема винтовых линий [2].

Также интерес представляет конструкция бурового долота [4], характерной особенностью которой является выполнение зубьев вооружения шарошек зигзагообразной формы с различным числом зубчатых рядов на каждой из шарошек (рисунок 1.10.1). Данное конструктивное решение позволяет свести к минимуму вероятность рейкообразования на забое в процессе работы инструмента, однако существенно затрудняет процесс промывки.

Существует несколько вариантов конструкций шарошечных долот, оснащенных зубчатым вооружением, расположенным по прямой кольцевой канавке. Однако данная геометрия зубьев не обеспечивает равномерности работы инструмента и эффективного скалывания породы, что приводит к быстрому изнашиванию зубчатого вооружения шарошек.

Известны конструкции буровых долот, оснащенных шарошками с зигзагообразным зубчатым вооружением (зигзагообразной кольцевой канавкой). На (рисунок 1.9.2) изображена принципиальная схема данной конструкции. Данное конструктивное решение позволяет осуществлять практически полное покрытие поверхности забоя, а также увеличить долговечность зубчатого вооружения [3].

Еще одним представителем ШБИ с КЗВ является шарошечное буровое долото (рисунок 1.10.2), предназначенное для работы в составе агрегатов РТБ - Ш490С-ЦВР-1(М) производства

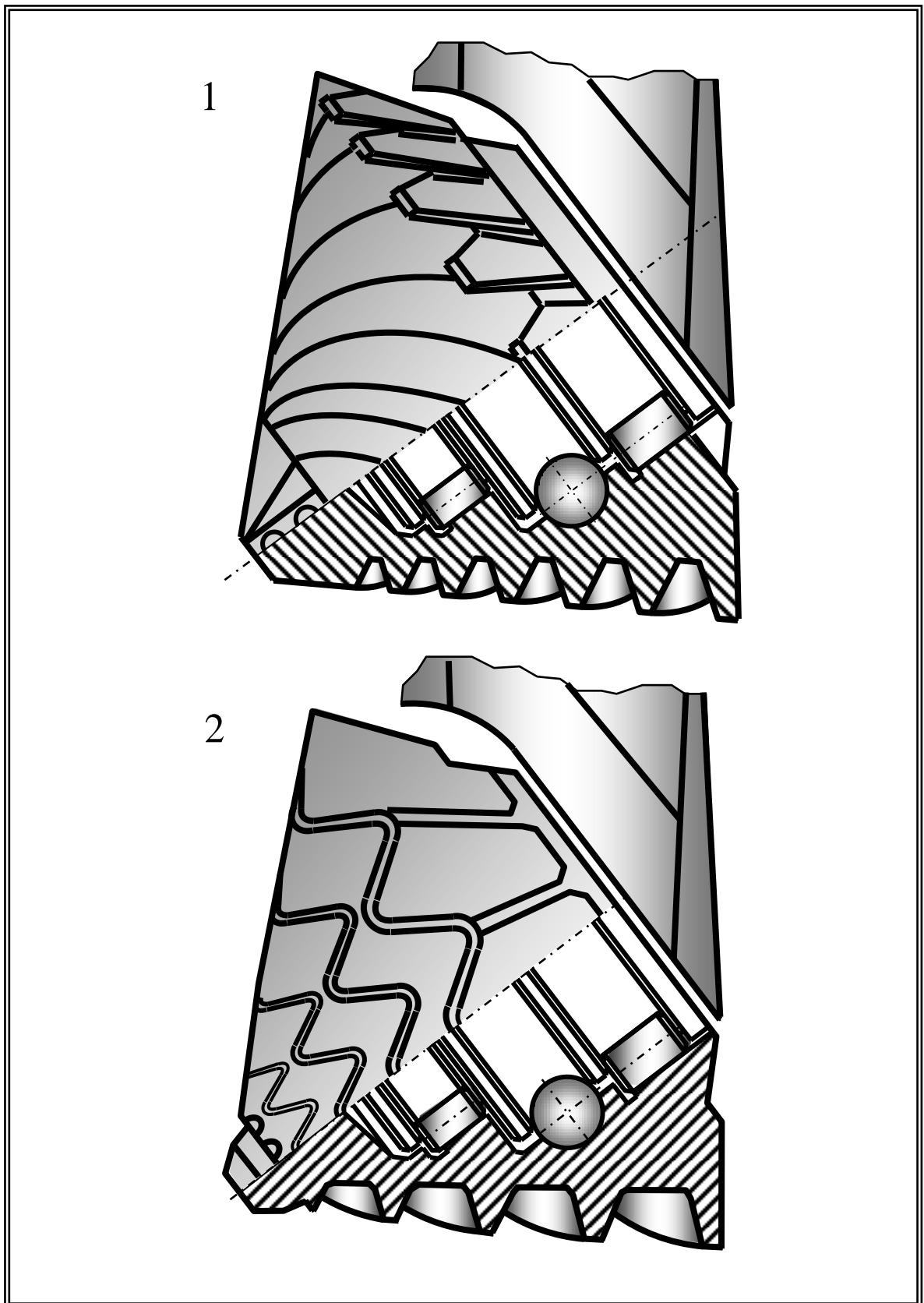


Рисунок 1.9 – Схемы геометрии вооружения шарошек буровых долот  
1 - с винтообразным вооружением; 2 - с зигзагообразным вооружением

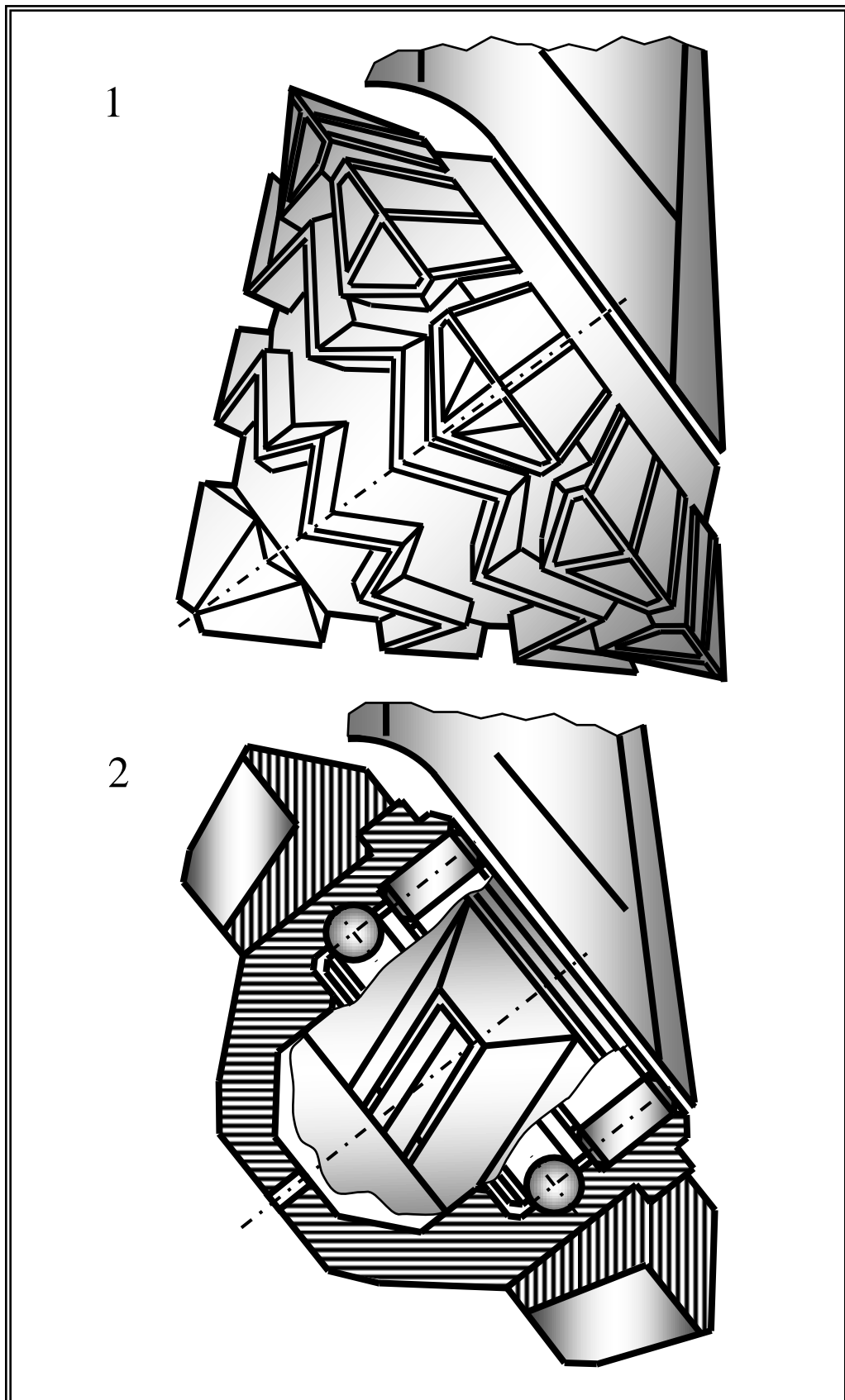


Рисунок 1.10 – Схемы геометрии вооружения шарошек буровых долот.

1 - зигзагообразное вооружение; 2 – разноориентированное зубчатое вооружение

ОАО «Сарапульский машзавод». Использование КЗВ в этой конструкции способствовало [93, 141, 170]:

- повышению стойкости вооружения к значительно большим, в сравнении с обычными способами бурения, знакопеременным динамическим нагрузкам, возникающим при работе долота в составе агрегата РТБ;
- повышению качества центробежного объемного армирования зубьев вооружения большой ширины.

Таким образом, проведенный анализ конструкций наиболее интересных представителей ШБИ с КЗВ показал, что использование КЗВ является достаточно перспективным направлением совершенствования ШБИ, тем не менее на сегодняшний день так и не удалось создать конструкцию, максимально раскрывающую весь потенциал данного типа вооружения.

Важнейшим преимуществом ШБИ со стальным армированным вооружением является возможность изготавливать конструкции шарошек со сложной геометрией вооружения, максимально отвечающей условиям бурения. Однако при производстве ШБИ с поверхностно-армированным вооружением (ПАВ) существуют отдельные технологические моменты, которые не дают возможности реализовать в полной мере вышеуказанное преимущество. Таким образом, при разработке новых конструкций ШБИ необходимо изучить существующие технологии его изготовления с целью устранения таких технологических операций, которые заведомо снижают качество бурового инструмента.

При производстве ШБИ используются специально разработанные долотные стали. Химический состав этих сталей представлен в таблице 1.2, а физико-механические свойства – в таблице 1.3 [24, 26, 48, 159, 164].

Существует два типа стального ПАВ: фрезерованное и литое. Фрезерованное вооружение создается путем фрезерования зубчатого вооружения из ковanej заготовки. Этот способ получения вооружения является наиболее распространенным в долотном производстве. Процесс фрезерования позволяет получать вооружение сложной конфигурации, с максимально возможным вылетом и высокой разрушающей способностью вооружения.

Процесс создания зубчатого вооружения заключается в формировании зубьев на шарошке с последующим их упрочнением посредством химико-термической обработки (ХТО) и армированием твердым сплавом.

Наиболее распространенным способом формирования зубьев вооружения шарошек является процесс фрезерования. Это достаточно станкометаллоемкий процесс. При фрезеровании зубьев большой объем металла превращается в стружку. Эта технология включает в себя использование большого количества разнообразного металлорежущего инструмента, использование которого существенно ограничивает возможности изготовления сложного разно-

ориентированного зубчатого вооружения. Это особенно важно при производстве ШБИ больших размеров, предназначенного для бурения мягких и средних пород, где зубья вооружения имеют максимальный вылет, а геометрия вооружения образует сложную геометрическую структуру.

Таблица 1.2 - Химический состав наиболее широко применяемых сталей

Марка стали	Диаметр долота, мм	Химический состав, %							
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P не более	S не более
20ХНЗА	для всех диаметров	0,17	0,30	0,17	0,60	2,75	-	0,015	0,02
		0,24	0,60	0,37	0,90	3,25			
І8ХНЗМА	311 и более	0,15	0,60	0,17	0,60	2,90	0,25	0,015	0,02
		0,20	0,90	0,37	0,90	3,70	0,35		
І6ХНЗМА	215,9÷295,3	0,13	0,35	0,17	0,40	2,75	0,20	0,015	0,02
		0,18	0,65	0,37	0,70	3,15	0,30		
17НЗМА	46÷212,7	0,15	0,35	0,17	≤	3,20	0,20	0,015	0,02
		0,20	0,65	0,37	0,30	3,80	0,30		
20ХНЗЛ	для всех диаметров	0,17	0,30	0,17	0,60	2,75	-	0,015	0,02
		0,22	0,60	0,37	0,90	3,15			

Таблица 1.3 - физико-механические свойства долотных сталей

Марка стали	Предел текучести, $10^7$ Па	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, $10^4$ Дж/м <sup>2</sup>	Прокаливаемость (HRC от торца 4,5 мм.)	
				пределы	разброс
20ХНЗА	74	50	67	33-39 (±2)	11
І8ХНЗМА	93	55	98	36-42 (±2)	11
І6ХНЗМА	88	60	108	35-41 (±2)	11
17НЗМА	74	55	88	33-39 (±2)	11
20ХНЗЛ	54	не менее 25	39	33-39 (±2)	11

Также существенным недостатком фрезерования является ослабление формы зубьев (разрушение текстуры металла, надрезы на обработанной поверхности), которые создают остаточные напряжения и при циклических знакопеременных нагрузках являются очагами возникновения микротрещин, способствуя разрушению вооружения [16, 38, 93, 170].

По данным заводов-изготовителей ШБИ трудоемкость фрезерования составляет до 25 % от общей трудоемкости изготовления шарошек, а коэффициент использования металла при изготовлении таких шарошек составляет 0,35 ÷ 0,40.

Ввиду перечисленных выше причин, при производстве ШБИ с диаметральными размерами более 300 мм, способ образования вооружения путем штамповки с последующим фрезерованием становится наиболее затратным.

Поэтому при производстве ШБИ больших диаметров (300 мм и более) на ОАО «СМЗ» шарошки изготавливались путем литья. Это позволило, на 20 ÷ 35% снизить себестоимость изготовления шарошек и на 30 ÷ 35% повысить коэффициент использования металла. Но, как из-

вестно, физико-механические характеристики сталей, полученных путем стационарного литья, существенно ниже, чем у кованных. Это является самым существенным недостатком литых шарошек, который является причиной невозможности получения достаточной прочности и твердости металла на внутренних поверхностях шарошек. Что, в свою очередь, значительно снижает работоспособность опорных узлов долота.

Долотные стали – низкоуглеродистые, при этом эксплуатируются в сложных условиях ударно-усталостного и абразивного изнашивания [16, 20, 38, 91, 170]. В связи с этим технология изготовления шарошек ШБИ предусматривает операции поверхностного упрочнения: ХТО с последующим армированием рабочих поверхностей зубьев шарошек твердым сплавом.

Для армирования зубчатого вооружения шарошек у нас в стране и за рубежом, в основном применяется релит – литой карбид вольфрама. Он выпускается в двух вариантах: зерновой и трубчато-зерновой и различными грануляциями. Для упрочнения зубчатого вооружения шарошек бурового инструмента малых типоразмеров (0,26 - 0,6), средних (0,4 - 0,85), больших (0,8 - 1,25) мм. Химический состав литого карбида вольфрама представлен в (таблице 1.3) [50,153,170].

Существенными недостатками релита являются: неоднородность формы и несовершенство технологии изготовления, включающей в себя размельчение релита в шаровой мельнице. Это приводит к образованию в зернах твердого сплава микротрещин, а также попаданию на поверхности зерен карбида вольфрама металлической пыли и различного рода включений [33,39].

Таблица 1.3 - Химический состав «релита»

Содержание элементов, %			
Вольфрам	Углерод общий	Углерод свободный	примеси
99,5-96,0	3,7-4,0	не более 0,06	не более 0,02

Основная цель процесса армирования вооружения – придать большую твердость и износостойкость основным рабочим поверхностям зубьев ШБИ. На сегодняшний день упрочнение различных поверхностей зубчатого вооружения шарошек в основном осуществляется путем поверхностного армирования твердым сплавом. Технология поверхностного армирования заключается в нагреве упрочняемой поверхности до стадии оплавления с последующим нанесением на нее зерен твердого сплава. Под действием силы тяжести зерна оседают в расплавленный металл и в процессе дальнейшей кристаллизации фиксируются в нем. При этом необходимо обеспечить выполнение следующих условий: надежно закрепить твердосплавные частицы в металле; максимально возможно сохранить физико-механические характеристики твердого сплава; обеспечить достаточную прочность соединения армированной зоны со стальной основой зубчатого вооружения шарошек [16, 170].



Существует множество различных технологических процессов поверхностного армирования, главным отличием которых является способ нагрева упрочняемой поверхности. В основном нагрев осуществляется высокочастотными токами, генерируемыми индукторами различной формы, пламенем ацетиленокислородной горелки, атомноводородным или аргонодуговым пламенем, плазмой, электродуговым способом и т. д. [50, 93, 163]. В России широко используются первый и второй способы, а в некоторых странах еще и третий. Все перечисленные выше технологические процессы поверхностного армирования являются достаточно трудоемкими, так как включают в себя последовательное нагревание и нанесение армирующего материала на рабочие грани зубьев вооружения, которых на шарошках больших диаметральных размеров может быть более двухсот.

Поверхностное армирование осуществляется смешиванием зернового релита с расплавленным слоем металла. Поверхность режущих элементов для армирования нагревают одним из вышеописанных способов. Армированный слой получается хрупким, неоднородным, вследствие чего при значительных знакопеременных ударных нагрузках в нем зарождаются микротрещины и происходит хрупкое выкрашивание [16, 40, 112]. Особо низким качеством отличается поверхностно-армированное вооружение долот с литыми режущими элементами, поскольку слой релита наплавляется на поверхность зубчатых элементов, покрытую литейной коркой, которая содержит различные неметаллические включения [40, 158, 159].

При эксплуатации поверхностно-армированного вооружения, ударно-усталостная стойкость которого незначительна [17, 41, 90], вследствие наличия большого количества концентраторов напряжений, обусловленных сильной неоднородностью армирующего композиционного материала и значительной концентрацией твердосплавного компонента в зоне армирования, происходят отслоение и скалывание армированного слоя (рисунок 1.11), что приводит к преждевременному износу вооружения.

В процессе работы ШБИ зубья его вооружения испытывают значительные динамические знакопеременные нагрузки, циклическое воздействие которых приводит к зарождению единичных, а затем и сетчатых микротрещин в твердосплавном покрытии. При этом стальная основа зубьев значительно пластичней, чем армированная твердым сплавом поверхность, вследствие этого при деформациях зубьев от воздействия сил реакции забоя твердосплавное покрытие интенсивно скалывается. Как правило, разрушение начинается в вершинной части зуба и далее распространяется до его основания [85, 86].

В процессе работы инструмента поверхностный армированный твердым сплавом износостойкий слой скалывается, что приводит к обнажению мягкой сердцевины зуба, в результате

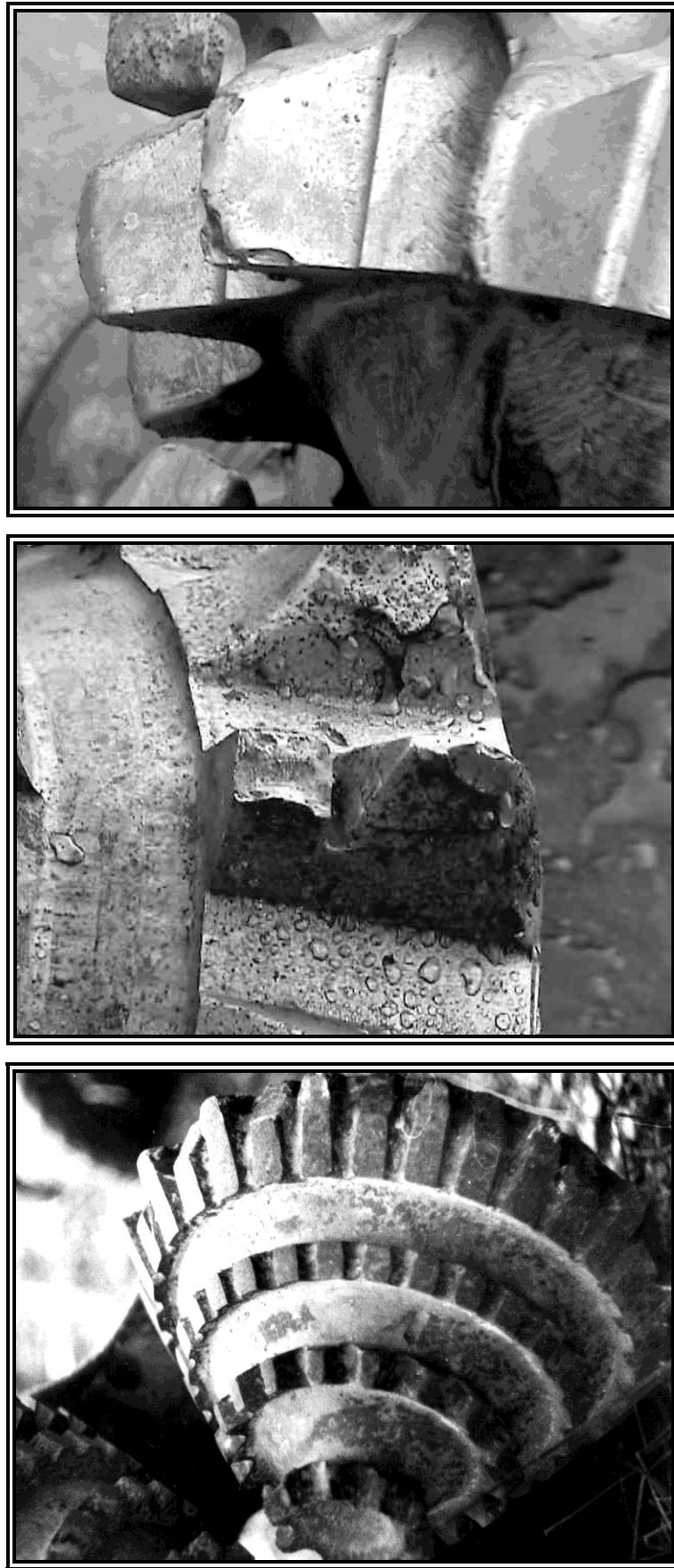


Рисунок 1.11 - Стадии износа поверхностно-армированного зубчатого вооружения

чего значительно увеличивается скорость износа зубьев вооружения посредством абразивного изнашивания. При этом зубчатое вооружение округляется и притупляется, в результате чего существенно снижается удельное давление зубьев на поверхность забоя.

Еще одним недостатком поверхностной, особенно газопламенной, наплавки является значительное искажение геометрии вооружения ШБИ.

Существует ряд других технологий формирования зубчатого вооружения: путем горячего накатывания зубьев [17, 40]; прессованием расплавленного металла под высоким давлением; штампованием с образованием полного профиля зуба; безоблойной штамповки и др. Однако перечисленные технологические процессы являются довольно сложными, трудоемкими и требующими использования специального дорогостоящего оборудования, что и не позволило найти им достойное применение в промышленном производстве.

Перспективным способом армирования вооружения ШБИ является процесс центробежного объемного армирования (ПЦОА) [40, 93, 170]. Как известно, центробежное литье по сравнению со стационарным позволяет существенно повысить точность геометрических параметров и поверхностную частоту отливки, а также значительно улучшить отвод газов в процессе ее остывания.

В свою очередь воздействие центробежной силы позволяет дополнительно уплотнить металл отливки, что повышает его физико-механические свойства и делает их соизмеримыми с аналогичными характеристиками металла полученного в результате процессаковки [17, 40, 50, 170]. В дополнение к этому в процессе центробежного литья металл периферии отливки подвергается более интенсивной очистке от различных включений и шлаков, которые перемещаются и концентрируются в свободной центральной части отливки.

Суть ПЦОА заключается в совмещении процесса центробежного литья с армированием зубчатого вооружения. Это достигается, за счет одновременной подачи расплавленной стали и зерен твердого сплава во внутреннюю полость вращающейся литейной формы.

Вследствие значительной разницы между плотностью твердого сплава и расплавленной стали зерна армирующего компонента под воздействием центробежных сил перемещаются в периферийную часть литейной формы, изнутри армируя собой зубья вооружения. Впервые данный технологический процесс был применен при изготовлении многовенцовых шарошек буровых долот [40] (рисунок 1.12), и в настоящее время существует большое количество его модификаций, разработанных под различные типы и конструкции вооружения бурового инструмента [17, 41, 170].

Как отмечалось ранее, в процессе центробежного литья шлаки и включения разного рода концентрируются в центральной части отливки, неминуемо снижая качество металла, однако именно здесь впоследствии формируются рабочие поверхности внешнего кольца подшипнико-

вого узла. С целью устранения этого недостатка было предложено одновременно с литьем шарошки вплавлять в нее центральный кованый стакан. Эксплуатационные испытания опытных партий инструментов с многовенцовыми шарошками, изготовленными по данной технологии [16, 17], показали существенное увеличение проходки и механической скорости бурения в сравнении со своими серийными аналогами, оснащенными поверхностно-армированным вооружением.

Как показала практика изготовления многовенцовых шарошек способом центробежного объемного армирования, данный процесс можно проводить только при постоянных технологических параметрах, таких как: температура и частота вращения литейной формы, объем и масса твердосплавного компонента [93, 170]. В связи с этим изготовление равностойких венцов с одинаковым качеством армирования было практически невозможным.

Также значительные ограничения накладывала двухкомпонентная конструкция шарошки с центральным вплавленным стаканом, которая и послужила одной из основных причин невозможности широкого внедрения шарошек данного типа в массовое производство.

Дальнейшим развитием совершенствования данного способа явилось формирование в центральном вплавляемом стакане специальных выступов с целью размещения в них твердосплавных частиц армирующего материала [16]. При этом расположение и ориентация выступов и количество в них армирующего компонента строго соответствуют венцам литейной формы, для армирования которых они предназначены. При заливке металла во вращающуюся составную литейную форму частицы твердосплавного армирующего компонента подхватываются жидкой сталью и перемещаются к периферии формы, тем самым армируя изнутри рабочие поверхности зубчатого вооружения каждого из соответствующих венцов шарошки.

Однако реализация и этого способа достаточно сложна и не лишена изъянов. Так попадание стали в начале процесса ее заливки на выступы центрального стакана, приваривает к нему частицы армирующего твердого сплава, тем самым снижает качество армирования зубьев вооружения шарошки.

Способ получения композиционного вооружения дозированным введением твердого сплава в зону армирования осуществляется путем введения в литейную форму, частично залитую жидким металлом, армирующего стакана, в пазах которого размещают зерновой твердый сплав, расположенный напротив армируемых венцов, стакан приводят во вращение, после чего форму останавливают, доливают в нее вторую половину расплава [16, 17].

В настоящее время разработаны две основные схемы заливки породоразрушающих инструментов, свободная и с вплавляемым опорным стаканом. Схема свободной заливки шарошек, в свою очередь, подразделяются на заливку отдельных дисков, отдельных зубчатых венцов,

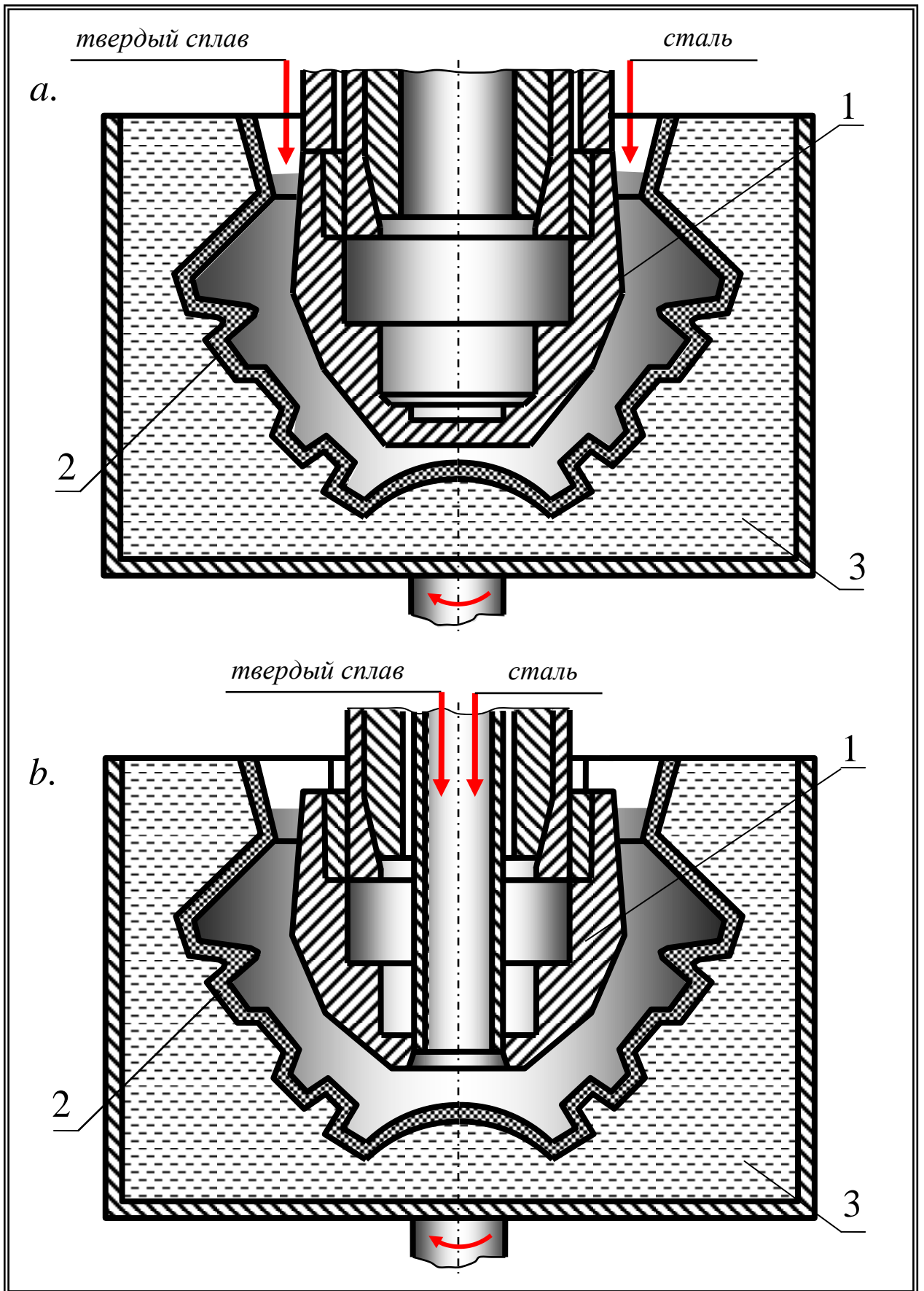


Рисунок 1.12 - Принципиальная схема центробежного армирования шарошек

1 – центральный стакан; 2 – литейная форма; 3 – опока формовочная

зубчатых и дисковых шарошек, а схема с вплаваемым опорным стаканом - на смещенную, обратную и центральную.

В процессе смещенной заливки (рисунок 1.12.а) жидкий металл и твердый сплав попадают в кольцевое пространство между керамической формой и вплаваемым опорным стаканом. Частота вращения при смещенной или полуцентробежной отливке шарошек ШБИ определяется так, чтобы скорость точки отливки, наиболее удаленной от оси вращения, составляла 3-5 м/с, при этом также необходимо соблюдение условия для создания возможности армирования обратного конуса шарошек.

Твердый сплав вводится равными объемными соотношениями с жидким металлом. Наибольшее (около 65 ÷ 70% ) количество твердого сплава сосредотачивается в периферийном венце шарошки.

Центральная заливка производится введением жидкого металла и твердого сплава через отверстие в опорном стакане. Частота вращения при центральной заливке определяется исходя из необходимости подъема твердого сплава к обратному конусу шарошки [16, 40, 93]:

С точки зрения промышленного использования наиболее приемлемы центральная и смещенная схемы заливки породоразрушающего инструмента. Смещенная схема заливки шарошек характеризуется простотой реализации, быстротой процесса и хорошими результатами, получаемыми при композиционном армировании.

Центральная заливка более длительна во времени, чем смещенная, что объясняется необходимостью полной кристаллизации металла в отливке под действием центробежных сил (рисунок 1.12.б). При центральной заливке существует вероятность попадания зерен твердого сплава в место соединения прибыли с телом шарошки, что приведет к невозможности ее механической обработки [41, 93].

Проведенный анализ показывает, что существующие конструкции вооружения ШБИ не всегда соответствуют характеру и условиям бурения, а технологии их изготовления являются трудоемкими и не обеспечивают необходимого качества вооружения.

### **1.3 Анализ процесса промывки и конструктивных особенностей промывочных систем шарошечного бурового инструмента**

Среди множества факторов, оказывающих влияние на эффективность разрушения горных пород, необходимо отметить процесс промывки скважин, а главное, его важнейшую составляющую - очистку призабойной зоны, в процессе которой происходят разрушение и отрыв частиц породы, уже отделенной от массива в результате механического воздействия зубьев шарошек долота с последующим выносом их в наддолотное пространство [11, 20, 28, 42].

Эффективность очистки призабойной зоны, по мнению множества исследователей, напрямую зависит от объема и скорости истечения промывочной жидкости, схем промывки и конструкций промывочных узлов [42, 122].

Для оптимизации этих параметров, авторами [20, 28] в стендовых условиях были определены направление и скорость потоков на забое и вдоль стенок скважины при различных схемах промывочных устройств; величина давления в этих зонах и ее взаимосвязь со скоростью и направлением потоков; вторичная измельчаемость шлама в зоне действия долота; взаимодействие потоков между собой и выбуренным шламом и т. д.

Многие работы в области промывки забоя скважины показывают, что на процесс бурения отрицательное влияние оказывает зашламленность забоя [20,29].

Так, лабораторные и промысловые исследования позволили М.Г. Бингхэму сделать вывод, что при идеальной чистоте забоя скорость бурения будет зависеть только от способности долота разрушать породу [12]. Этот вывод он проиллюстрировал зависимостью углубления забоя за один оборот ШБИ от удельной осевой нагрузки на долото  $q_g$  (рисунок 1.13). Где  $OE$  - линия идеального условия бурения;  $OA$  - "рабочая кривая", определяющая максимум возможной проходки на долото при данной нагрузке в промысловых условиях, т. е. проходки, которую можно получить при очистке забоя газообразными агентами или при минимальном статическом давлении промывочной жидкости;  $CB$  - соответствует минимальному углублению и характеризует условие значительного зашламления забоя. Позже эти выводы были подтверждены и развиты другими авторами.

Также, известно, что с ростом глубины скважины механическая скорость проходки падает [25, 47]. Такое падение механической скорости проходки с увеличением глубины скважины обусловлено в первую очередь ростом дифференциального давления, т. е. разности между гидростатическим и пластовым давлениями. Это подтверждают и лабораторные исследования [20, 28, 29, 47].

А.Х. Гарньер и Н.Х. Ван-Линген определили, что величина дифференциального давления обуславливает как прочность породы, так и силу, прижимающую частицы шлама к поверхности забоя [25]. Эти прижимающие силы, как правило, имеют статическую или динамическую природу и являются сложной функцией практически всех основных показателей, характеризующих процесс разрушения породы забоя при бурении.

Исследования, проведенные в промысловых условиях, позволили установить зависимость между дифференциальным давлением и механической скоростью бурения [25, 47], а также дали возможность сделать определенные выводы:

- с увеличением дифференциального давления от 0 до 7,0 МПа падение механической скорости составило 24-73 %;

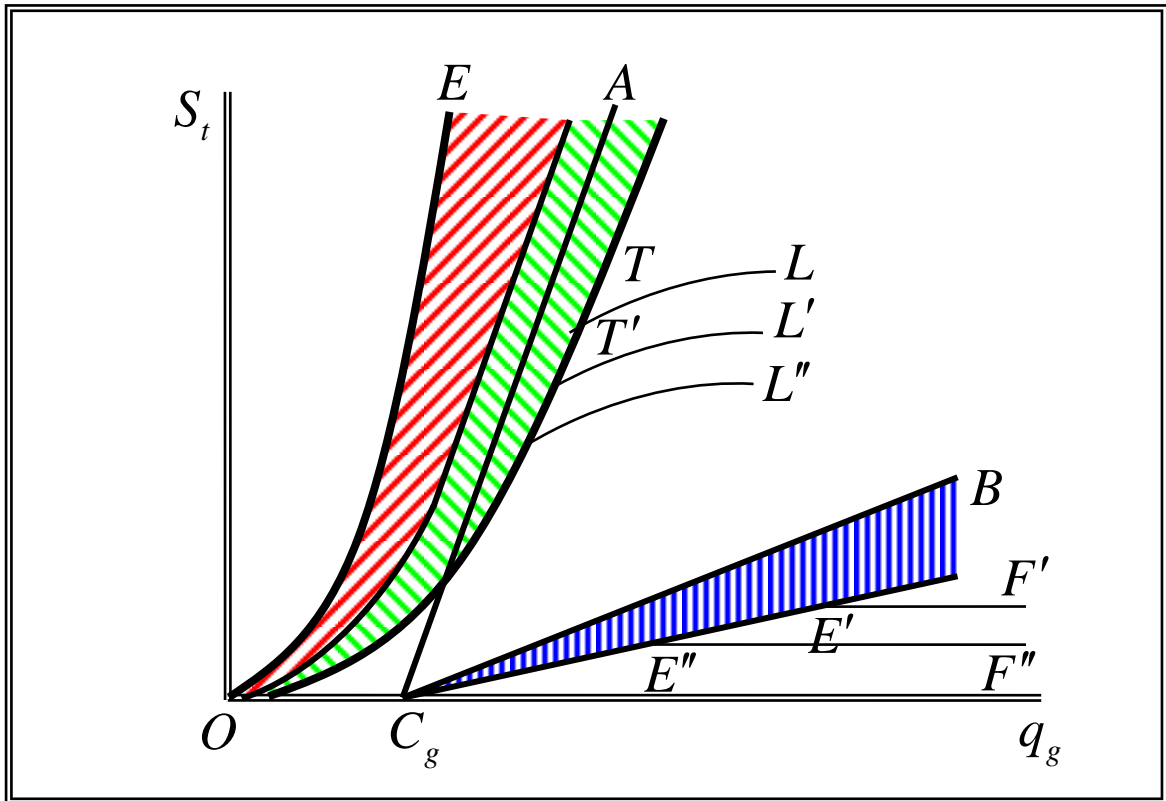


Рисунок 1.13 - Зависимость проходки при данной нагрузке от степени очистки забоя

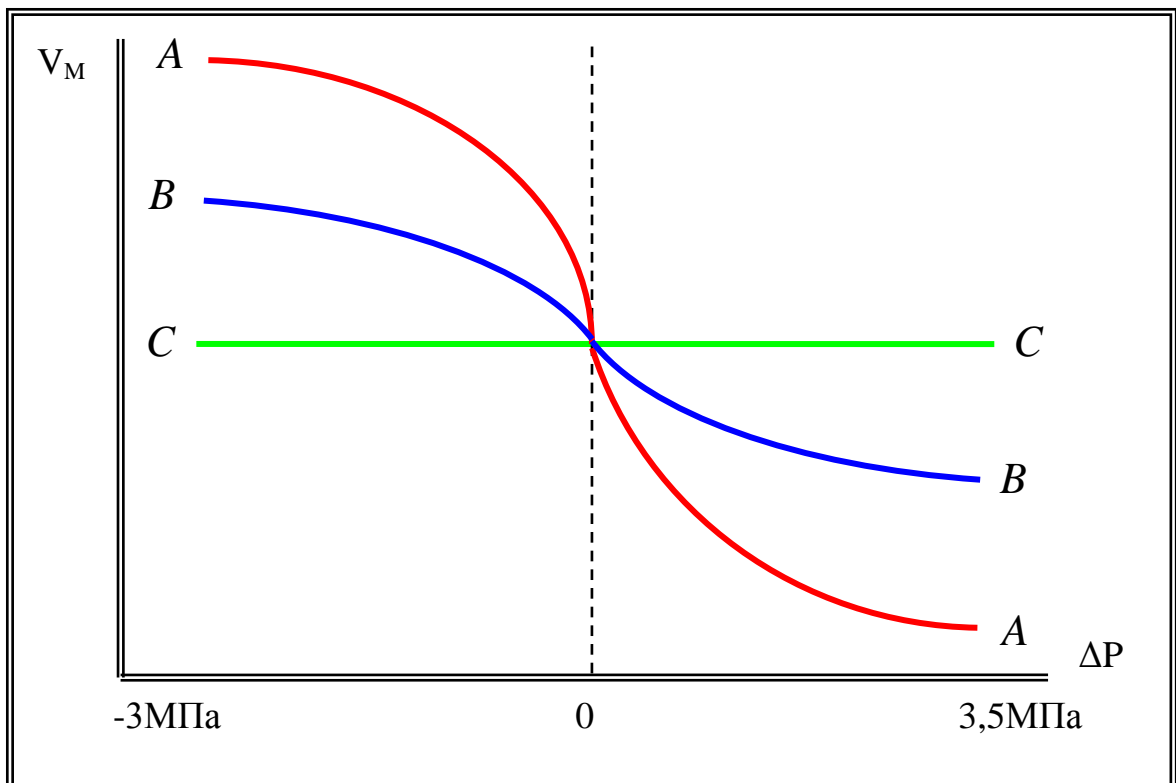


Рисунок 1.14 - Влияние дифференциального давления на механическую скорость бурения



- механическая скорость проходки продолжает расти по мере того, как пластовое давление становится выше гидростатического;
- чувствительность механической скорости проходки к изменениям дифференциального давления повышается с ростом нагрузки на долото.

На (рисунок 1.14) приведена группа обобщенных кривых по исследованиям, которая показывает влияние дифференциального давления на скорость проходки в трех различных породах: *A*, *B*, *C* - линии для пород с нулевой, средней и высокой пористостью и проницаемостью, соответственно. Как видно из рисунка, изменение дифференциального давления в пределах  $\pm 3,5$  МПа оказывает значительное влияние на скорость бурения.

Совершенствование промывочных устройств шарошечных долот с целью улучшения очистки забоя скважины от выбуренного шлама породило, особенно в последние годы, большое количество схем и конструкций промывочных устройств [20, 28, 35, 117].

В настоящее время наибольшее распространение получили три основные схемы [45] (рисунок 1.16) промывки ШБИ:

1. Центральная схема промывки: с круглым или щелевым каналом внутри ниппельной части долота или с центральной гидромониторной насадкой.
2. Боковая схема промывки с гидромониторными насадками: с симметричным и асимметричным расположением насадок.
3. Комбинированная, сочетающая в себе элементы как первой, так и второй.

К первой можно отнести долота с центральными, цилиндрическими, щелевыми промывочными каналами, с центральными сменными промывочными насадками, предусматривающими скорости истечения промывочной жидкости до  $40 \div 50$  м/с.

Отличительной чертой всех этих схем является отсутствие отрицательных взаимодействий потоков промывочной жидкости друг с другом. Потоки жидкости от центра забоя устремляются к стенкам скважины, вынося выбуренный шлам к периферии забоя и далее вверх в наддолотную зону. Но такое движение потоков обуславливает и отрицательные стороны большинства схем этой группы - движение промывочной жидкости вместе со шламом вверх вдоль спинок лап долота, что приводит к их интенсивному износу [28]. Кроме того, в проемах между лапами потоки промывочной жидкости подвергаются эжекции со стороны высокоскоростной струи из центральной насадки, в результате чего часть этих потоков вместе со шламом устремляется внутрь долота, что приводит к повторному попаданию шлама в зону действия шарошек.

Ко второй группе (рисунок 1.16) относятся долота с тремя боковыми обычными или удлиненными насадками. Основной отличительной особенностью боковой промывки является желание использовать эффект разрушающего действия струи на забой, в связи с чем конструкции лап претерпели некоторые изменения, с целью разделения основного потока промывочной

жидкости и направления его составляющих в боковые гидромониторные узлы и далее на поверхность забоя. Максимальный эффект при использовании данной схемы достигается при разбурировании мягких или слабосцементированных средних пород [11, 28].

Однако данная схема имеет существенный недостаток, заключающийся в значительном уменьшении свободного сечения скважины в призабойной зоне, являющегося основным путем эвакуации шлама с поверхности забоя в наддолотную зону, т. е. струи гидромониторных насадок как бы запирают шлам на забое [20, 28]. В меньшей степени это относится и к схеме с удлиненными насадками. Кроме того, в результате взаимодействия струй из соседних насадок образуются высокоскоростные потоки, поднимающиеся вместе со шламом вдоль спинок лап, что приводит к их интенсивному износу [20, 172].

Вместе с тем эта схема имеет важное преимущество перед первой схемой промывки. Оно заключается в интенсивной промывке наиболее зашламленной периферийной зоны забоя, где скорость поперечных потоков промывочной жидкости, уносящей шлам из этой зоны, имеет наибольшую величину. Кроме того, симметричность промывочных устройств обуславливает стабильность работы долота и предотвращает искривление скважины в результате возникновения реактивного момента, возникающего при истечении промывочной жидкости из гидромониторных насадок.

В долотах с асимметричной схемой промывки работают только две гидромониторные насадки. Это коренным образом влияет на процесс формирования потоков на забое.

Результирующий поток устремляется вдоль забоя по свободному от гидромониторной струи проему к периферии и далее вдоль стенки скважины вверх в наддолотную зону. Но это обуславливает и слабую сторону данной схемы. Высокоскоростной мощный поток в свободном проеме эжектирует жидкость из соседних проемов, которая вместе со шламом движется в зону свободного проема между спинок лап долота и стенкой скважины. Кроме того, не исключен и подъем жидкости вдоль спинки лапы, находящейся между проемами с гидромониторными насадками, что приводит к интенсификации износа лап долота [20, 28].

На (рисунок 1.17) и (рисунок 1.18) представлены картины движения потоков промывочной жидкости вдоль стенки скважины для схем промывки с тремя и двумя боковыми насадками, соответственно. Как видно из приведенных рисунков, симметричная схема промывки, включающая три боковые насадки, характеризуется двумя основными потоками. Первый - нисходящий, создается струей промывочной жидкости, проходящей через насадку, и эжектирует промывочную жидкость из свободного проема как ниже, так и выше гидромониторного узла, что приводит к повторному попаданию в зону разрушения породы уже ранее поднятого с забоя шлама (положение -  $60^\circ$ ). Второй – восходящий, образуется при взаимодействии струй из двух

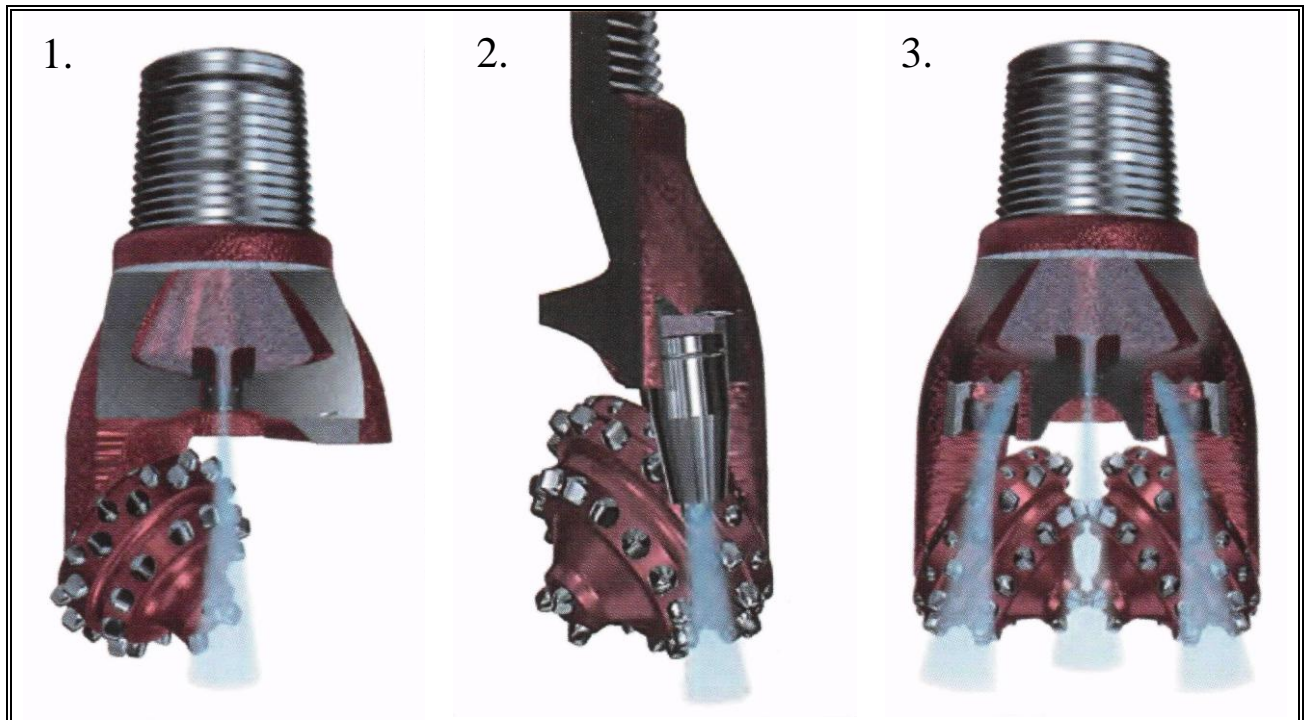


Рисунок 1.15 - Варианты схем промывки шарошечных буровых долот

1 - центральная; 2 - боковая; 3 - комбинированная

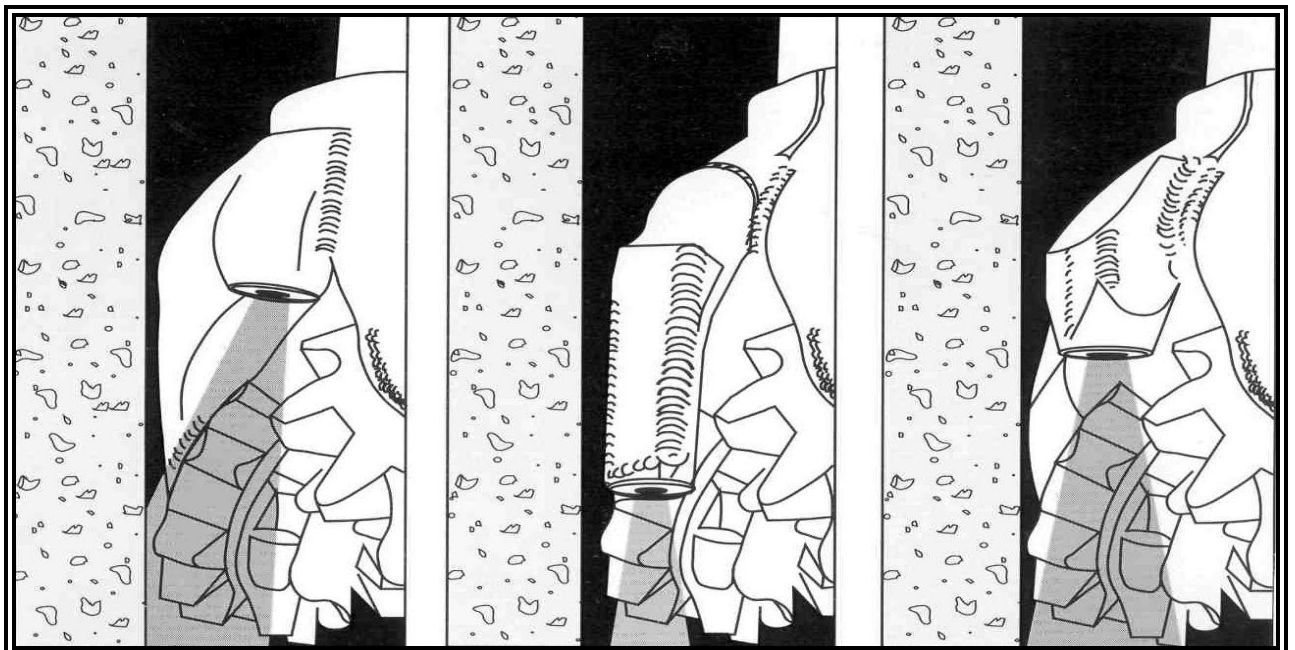


Рисунок 1.16 - Варианты конструкций боковых гидромониторных узлов

смежных насадок и представляет собой высокоскоростной поток промывочной жидкости, поднимающийся вдоль спинок лап и увлекающий за собой шлам с поверхности забоя, приводя к повышенному износу лап в указанной зоне (положение  $0-30^\circ$ ).

Это связано с тем, что гидромониторные насадки, как правило, располагаются под некоторым углом по отношению к оси вращения долота в сторону набегающей шарошки. В связи с этим взаимодействие потоков промывочной жидкости, истекающей из двух смежных насадок, осуществляется в месте, смещенном в направлении положения « $30^\circ$ ». При этом, по достижении поверхности забоя, часть общего потока струи, истекающей из гидромониторной насадки, обладающая большей мощностью, направляется в сторону набегающей шарошки. Это приводит к еще более значительному отклонению результирующего потока, однако способствует снижению износа спинок лап долота, связанного с движением поднимающегося шлама.

На (рисунок 1.19) представлена картина распределения полей скоростей и давлений в проеме долота, наибольшая скорость промывочной жидкости характерна для ее слоев, соседствующих со струей промывочной жидкости из насадки. Величина и направление скорости струи из насадки определяют величину скорости и направление движения в соседних слоях промывочной жидкости. Чем ближе слой промывочной жидкости к струе из насадки, тем больше его скорость и тем больше совпадает его направление с направлением скорости струи.

После столкновения струй жидкости в центре забоя образуется застойная зона (рисунок 1.20). Но на высоте  $0,25h/H$  по оси долота движение промывочной жидкости осуществляется вверх. Значит, после столкновения в центре забоя потоки как бы обтекают застойную зону и образуют восходящий поток вдоль оси долота. Движению промывочной жидкости соответствует и падение величины статического давления по высоте. При выходе из стесненного пространства на высоте  $0,5h/H$ , как и при исследованиях, вдоль стенки скважины изменения величины давления  $P_{СК}$ , величина статического давления  $P_{СТ}$  становится близкой к давлению столба жидкости в скважине.

Минимального значения величина давления достигает в слоях жидкости, близких к струе из насадки, где из-за эжекционного воздействия высокоскоростной струи наблюдается разрежение (рисунок 1.20),

где  $V_H$  - скорость истечения промывочной жидкости из насадок, м/с;  $V$  - скорость потока в исследуемой точке, м/с;  $P_H$  - величина противодавления в данной точке, МПа;  $P_D$  - перепад давления на долоте, МПа.

На высоте от  $0,67$  и до  $0,75h/H$  вдоль оси долота вновь наблюдается застойная зона. Поток промывочной жидкости, поднимающийся вдоль оси долота, сталкивается с телом до

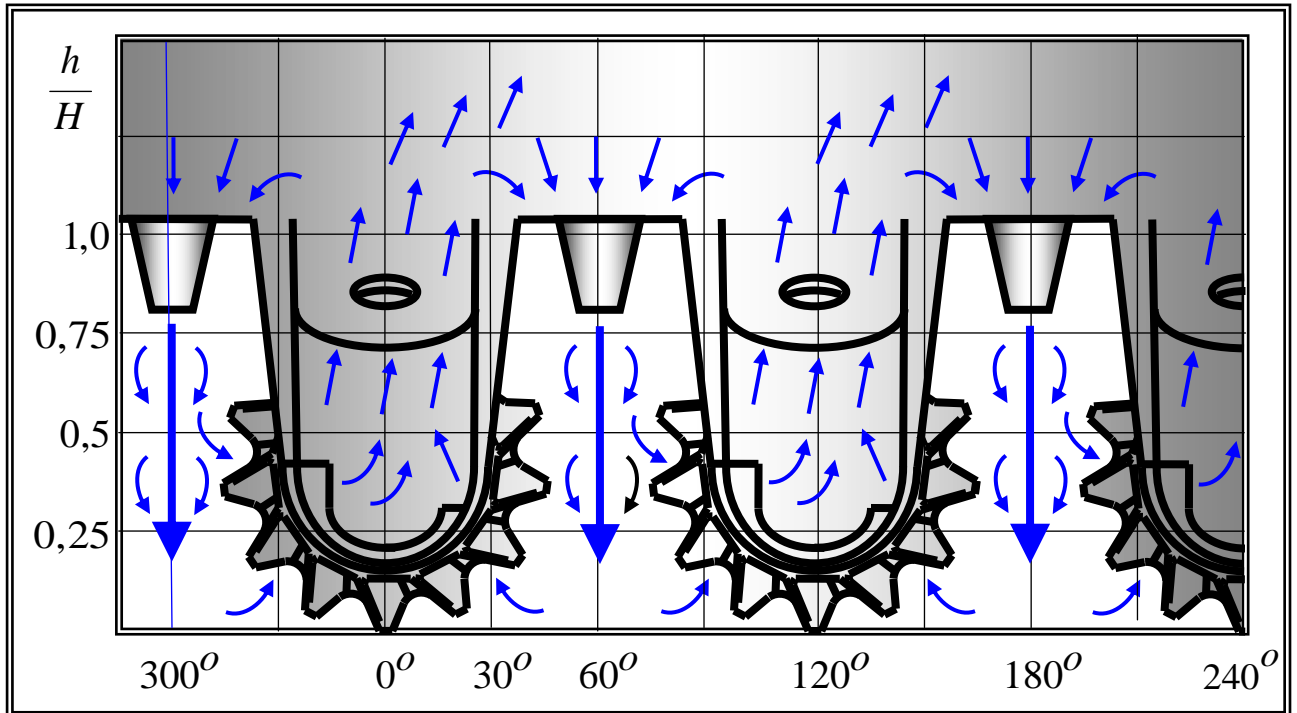


Рисунок 1.17 - Схема направления потоков промывочной жидкости вдоль стенки скважины для долота с тремя боковыми насадками.

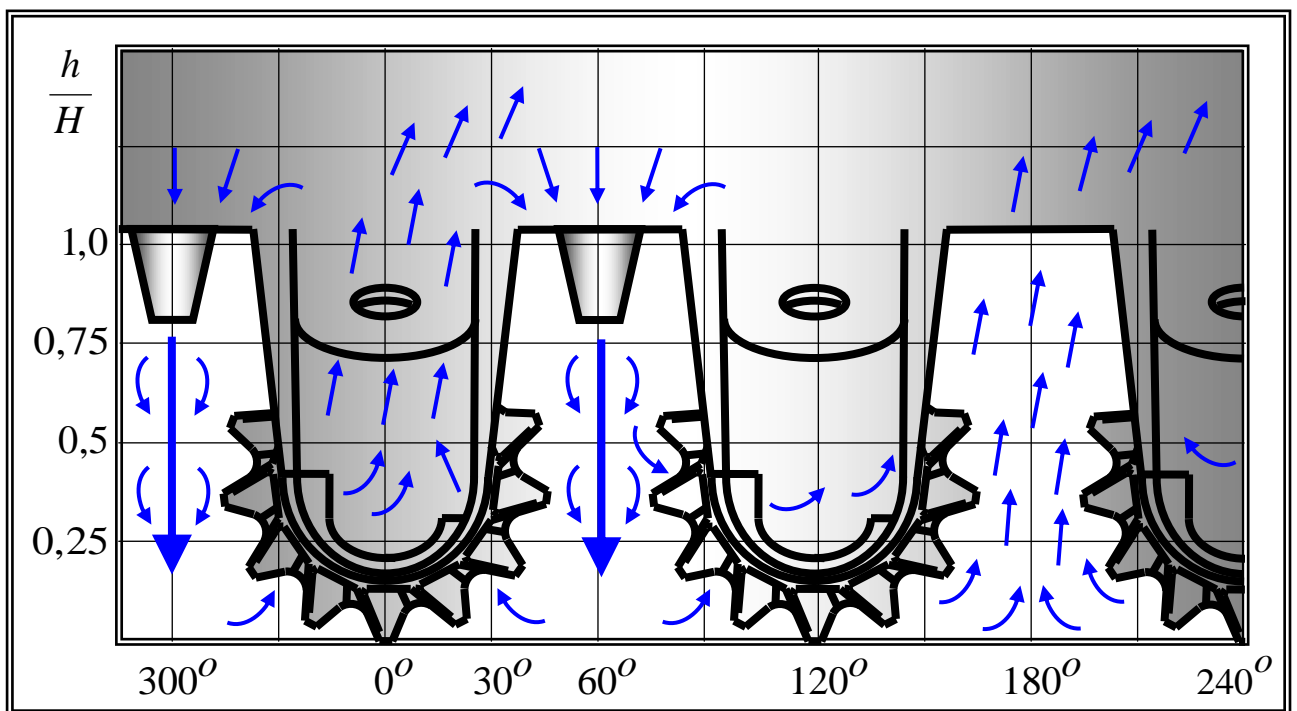


Рисунок 1.18 - Схема направления потоков промывочной жидкости вдоль стенки скважины для долота с двумя боковыми насадками

лота и резко изменяет свое направление. В месте его столкновения образуется зона неподвижной промывочной жидкости с повышенным статическим давлением.

Если рассмотреть, в общем, картину распределения скоростей по проему при схеме промывки с тремя боковыми насадками (рисунок 1.19), то можно увидеть, что движение промывочной жидкости в этой зоне происходит по замкнутому кругу.

Это подтверждается и работами других авторов. В частности, работой [28], где рассмотрено развитие струи в условиях забоя скважины и сделан вывод, что границами затопленной ограниченной струи не являются прямые линии, а линии присоединенных масс являются кривыми замкнутого типа. Этим объясняются и результаты замеров повторной измельчаемости шлама при данной схеме промывки, полученных А.М. Гусманом и Б.И. Мительманом [29].

Как правило, промывочная жидкость, обогащенная частицами разрушенной породы, поднимаясь вверх с поверхности забоя, практически останавливается во внутренней надшарошечной зоне долота. Далее струи промывочной жидкости, истекающие из гидромониторных насадок, эжектируют ее, вновь увлекая к поверхности забоя. Это приводит к многочисленному повторному перемалыванию шлама зубчатым вооружением шарошек и, как следствие, к его повышенному износу.

В долотах с асимметричной промывкой работают только две гидромониторные насадки. Это коренным образом влияет на формирование потоков на забое скважины. Результирующий поток устремляется вдоль забоя по свободному от гидромониторной струи проему к периферии и далее вдоль стенки скважины вверх в наддолотную зону. Но это обуславливает и слабую сторону данной схемы. Высокоскоростной мощный поток в свободном проеме эжектирует жидкость из соседних проемов, которая вместе со шламом движется в зону свободного проема между спинок лап долота и стенкой скважины. Кроме того, не исключен и подъем жидкости вдоль спинки лапы, находящейся между проемами с гидромониторными насадками, что приводит к интенсификации износа лап долота [20, 27, 28, 143].

На (рисунок 1.20) и (рисунок 1.21) представлены поля скоростей и давлений при схемах промывки с двумя боковыми насадками для проемов с работающей насадкой и без насадки, соответственно.

Для проемов с работающими насадками скорости и давления в слоях промывочной жидкости, примыкающих к струе из насадки, аналогичны скоростям и давлениям при схеме промывки с тремя боковыми насадками (рисунок 1.19). Но в отличие от ранее рассмотренной схемы при данной схеме промывки взаимодействие только двух струй в центре забоя не ведет к возникновению потока промывочной жидкости вдоль оси долота. Рассматривая совместно (рисунок 1.20) и (рисунок 1.21), можно установить, что появляется большой круг

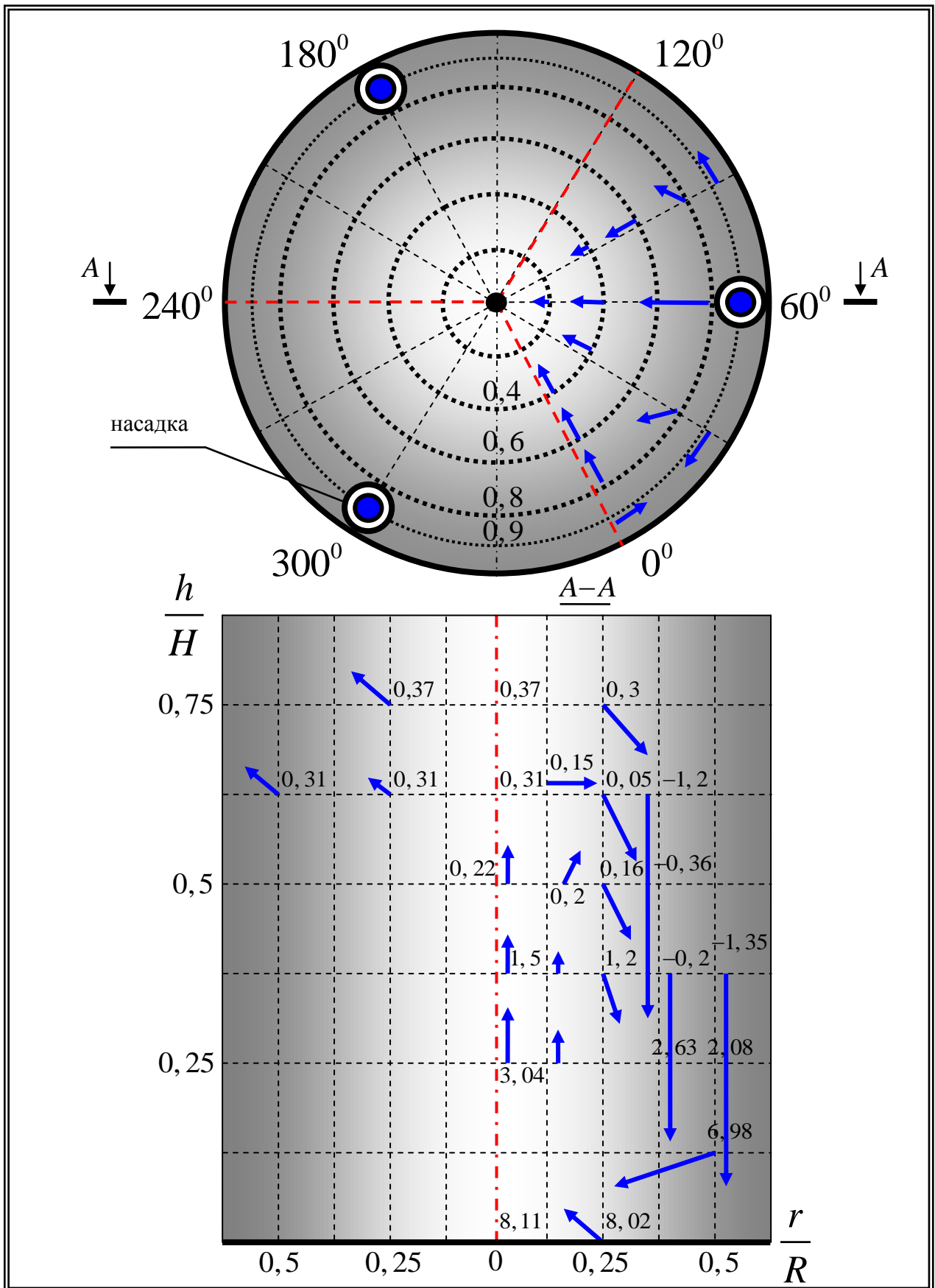


Рисунок 1.19 - Схема направления потоков в горизонтальной и вертикальной плоскостях скорость в точках  $V/V_H$  обозначена векторами, давление в точках  $\frac{P_{CT} - P_{II}}{P_D}$  числами в %

движения промывочной жидкости - вниз по проему с насадкой, вдоль забоя, вверх вдоль свободного проема и, разделяясь на два рукава, из которых больший идет в кольцевое затрубное пространство через внутреннюю надшарошечную зону, эжектируется снова струями из насадок и направляется к забою. То есть движение жидкости в этой зоне долота, при промывке с двумя насадками, не имеет полностью замкнутого характера, так как большая часть жидкости со шламом поднимается вверх по свободному проему, а в круговое движение вовлечена меньшая часть жидкости и, следовательно, значительно меньшее количество шлама будет подвергнуто вторичному измельчению, что подтверждается результатами работы [28].

И, наконец, к третьей группе относятся буровые долота, одновременно оснащенные различными элементами двух первых схем, а также имеют свои отличительные особенности (рисунки 1.15.3). Как было отмечено ранее, основным недостатком ШБИ с различными боковыми схемами промывки является высокая вероятность образования сальника в надшарошечной зоне инструмента, в особенности при бурении глиносодержащих пород, вследствие перемещения определенного объема разрушенной породы в центральную часть забоя и надшарошечное пространство. Это значительно осложняет эвакуацию шлама из зоны работы бурового инструмента, приводит к его многократному повторному измельчению, что неминуемо самым негативным образом сказывается на эффективности проведения буровых работ.

В связи с этим в настоящее время значительно возросли объемы производства шарошечного бурового инструмента, оснащенного различными комбинированными системами промывки, наличие которых позволяет практически полностью исключить сальникообразование и гарантирует качественную очистку как вооружения, так и всей призабойной зоны в течение всего времени работы инструмента.

Наибольший интерес представляют разработки РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина совместно с Дрогобычским долотным заводом гидромониторных долот с асимметричной схемой промывки и эжектированием [20], где с помощью изогнутых патрубков промывочная жидкость из ниппельной части долота подводится к отверстиям в лапах, что способствует интенсификации удаления бурового шлама из внутридолотной застойной зоны. А также разработки РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина совместно с ОАО «Сарапульский машзавод» долот большого диаметра, оснащенных как боковыми гидромониторными насадками, так и центральной специальной конструкции.

Существуют и другие комбинированные схемы промывочных устройств, но они не нашли широкого применения и потому мало изучены.



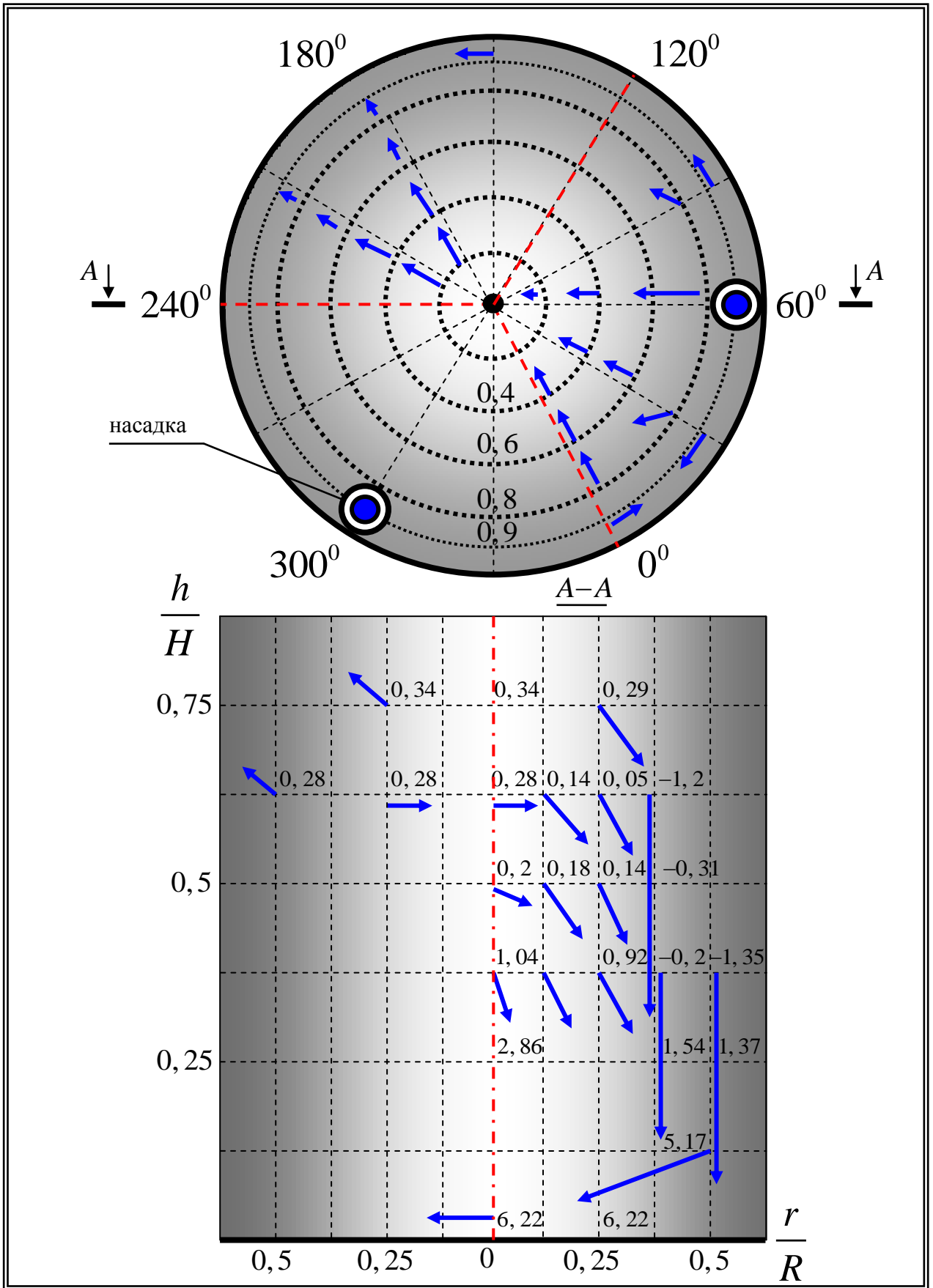


Рисунок 1.20 - Схема направления потоков в горизонтальной и вертикальной плоскостях  
 скорость в точках  $V/V_H$  обозначена векторами, давление в точках  $\frac{P_{CT} - P_{II}}{P_D}$  числами в %

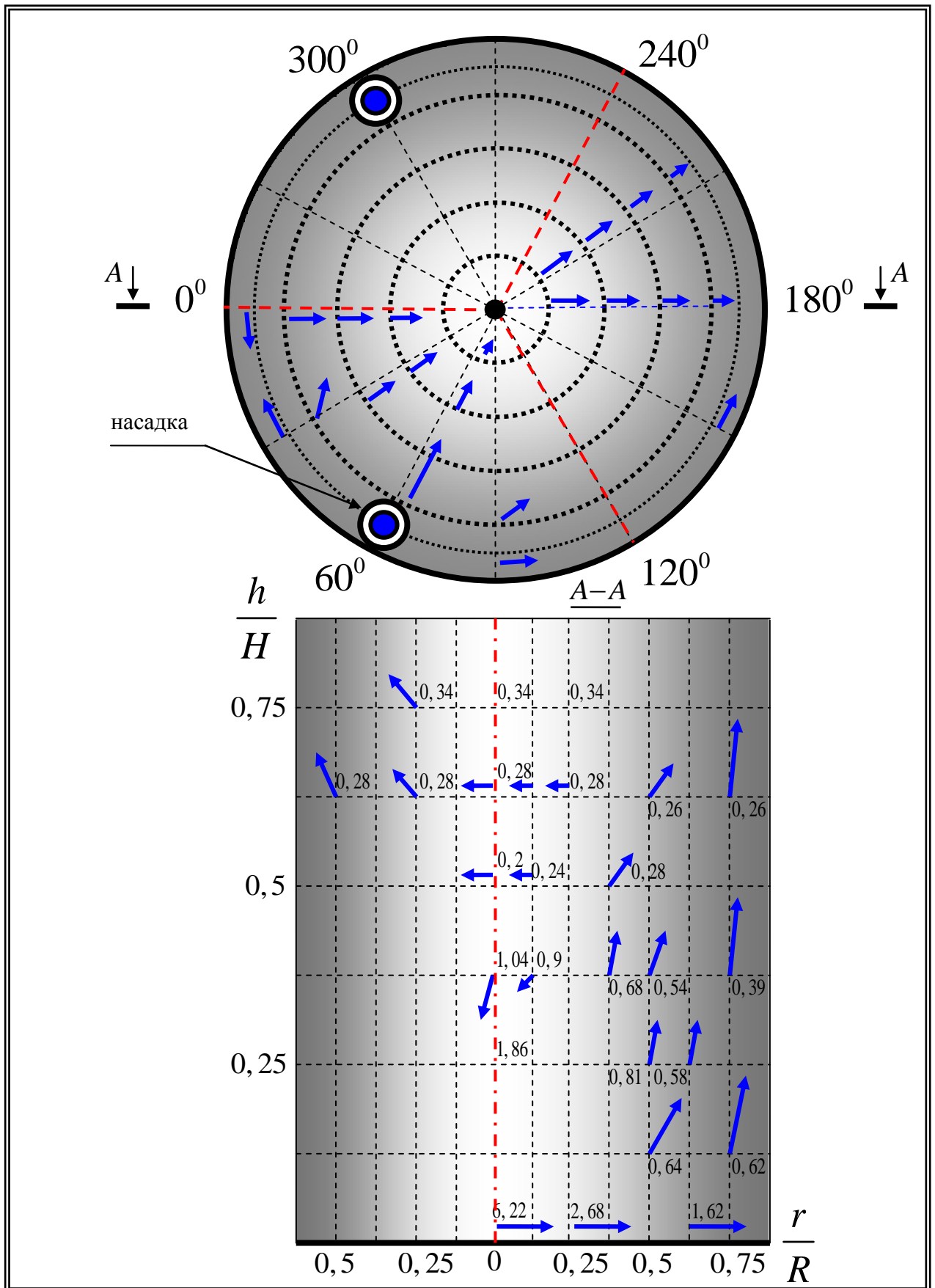


Рисунок 1.21 - Схема направления потоков в горизонтальной и вертикальной плоскостях  
 скорость в точках  $V/V_H$  обозначена векторами, давление в точках  $\frac{P_{ст} - P_{II}}{P_D}$  числами в %

Косвенным подтверждением представленных выше исследований является анализ износа шарошек долот с различными схемами промывки [29]. Так, для долот с центральной схемой промывки характерен большой износ периферийного венца шарошек, работающего в области скопления шлама, принесенного потоками с центра забоя. В этом месте, в результате резкого изменения направления потока жидкости, образуется "застойная" зона. Этим же объясняется преимущественный износ набегающей шарошки, расположенной в свободном проеме гидромониторного долота с двумя боковыми насадками (асимметричная схема). Для долот с тремя боковыми гидромониторными насадками характерен превалирующий износ вооружения по вершинам шарошек, вследствие транспортировки шлама с периферии к центру забоя [20, 28].

Таким образом, анализ существующих схем промывки бурового инструмента, а также их влияния на эффективность очистки призабойной зоны от выбуренного шлама показал, что существующие в настоящее время схемы промывки ШБИ имеют ряд существенных недостатков и в то же время обладают значительными резервами для их дальнейшего совершенствования.

### **Выводы по главе 1**

1. Анализ кинематики и условий работы вооружения ШБИ показал, что у подавляющего большинства существующих буровых долот со смещенными осями вращения шарошек ориентация зубьев (прямоугольного) вооружения не обеспечивает их эффективную работу в условиях повышенного скольжения.
2. Проведенный анализ конструкций и технологий изготовления вооружения ШБИ свидетельствует о том, что существующие конструкции вооружения бурового инструмента не всегда соответствуют характеру и условиям бурения, а технологии их изготовления являются трудоемкими и не обеспечивают необходимого качества вооружения.
3. Анализ конструктивных особенностей систем промывки ШБИ и их влияния на эффективность очистки забоя от выбуренного шлама показал, что существующие в настоящее время схемы промывки ШБИ имеют существенные недостатки и в то же время обладают значительными резервами для их дальнейшего совершенствования.

## ГЛАВА 2.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КИНЕМАТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
КОСОЗУБОГО ВООРУЖЕНИЯ ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА  
С ЗАБОЕМ ПРИ КЛАССИЧЕСКОМ И РЕАКТИВНО-ТУРБИННОМ БУРЕНИИ**

**2.1 Исследование процесса взаимодействия косозубого вооружения  
с забоем скважины при бурении мягких пород**

Чтобы разработать и создать более эффективную геометрию КЗВ ШБИ, нужно точно определить направление и величину скольжения каждого из зубьев вооружения, в процессе их взаимодействия с забоем скважины. Как отмечалось ранее, ШБИ, предназначенный для разбуривания мягких пластичных пород, оснащается шарошками с многоконусным профилем, при этом оси вращения шарошек смещены относительно оси долота. Зубчатое вооружение изготавливается самоочищающимся и имеет значительный вылет вершин шарошек относительно центра долота [50].

Схемы движения гладкой многоконусной шарошки с различными вариантами смещения оси ее вращения относительно центра ШБИ представлены на (рисунок 2.1 и рисунок 2.2), где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  - угловые скорости вращения долота и шарошки, соответственно,  $c^{-1}$ .

Как видно из рисунков, переносные скорости  $\vec{V}_1$ , связанные с вращением ШБИ в точках  $E, M, N, H$ , лежащих на образующей в месте ее контакта с поверхностью забоя, будут направлены по ходу вращения инструмента и под прямым углом относительно радиуса вращения каждой из этих точек вокруг центра вращения ШБИ -  $O$ . В то же время, относительные скорости этих точек  $\vec{V}_2$  направлены по ходу вращения шарошки и под прямым углом к ее образующей или оси вращения.

Разложим переносную скорость на две ее составляющие  $\vec{V}_1'$  - в направлении относительной скорости и  $\vec{V}_1''$  - вдоль образующей. Если сложить поперечную составляющую переносной скорости  $\vec{V}_1'$  с относительной  $\vec{V}_2$ , можно определить направления и величины поперечных составляющих скоростей скольжения для каждой из рассматриваемых точек  $\vec{V}'_{CK}$ .

В случаях, показанных на (рисунок 2.1 и рисунок 2.2), относительная скорость -  $\vec{V}_2$  в точках  $E, M$  превосходит величину скорости -  $\vec{V}_1'$ . Это связано с тем, что поперечная скорость скольжения в каждой из точек  $E, M$  представляет собой окружную скорость при вращении относительно мгновенной оси  $ON$  и направлена в обратную сторону по отношению к движению

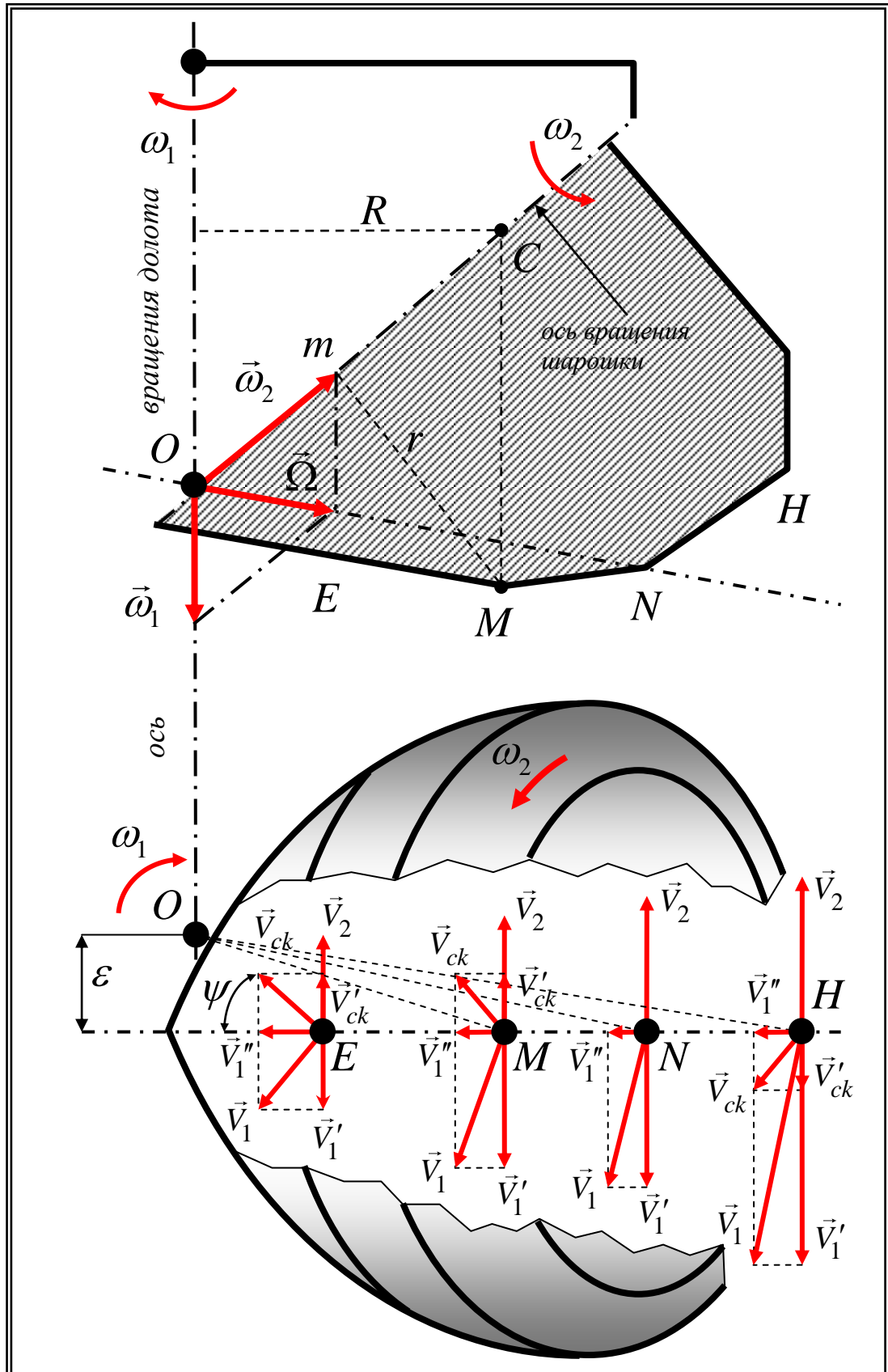


Рисунок 2.1 - Схема движения гладкой многоконусной шарошки со смещенной в плане осью

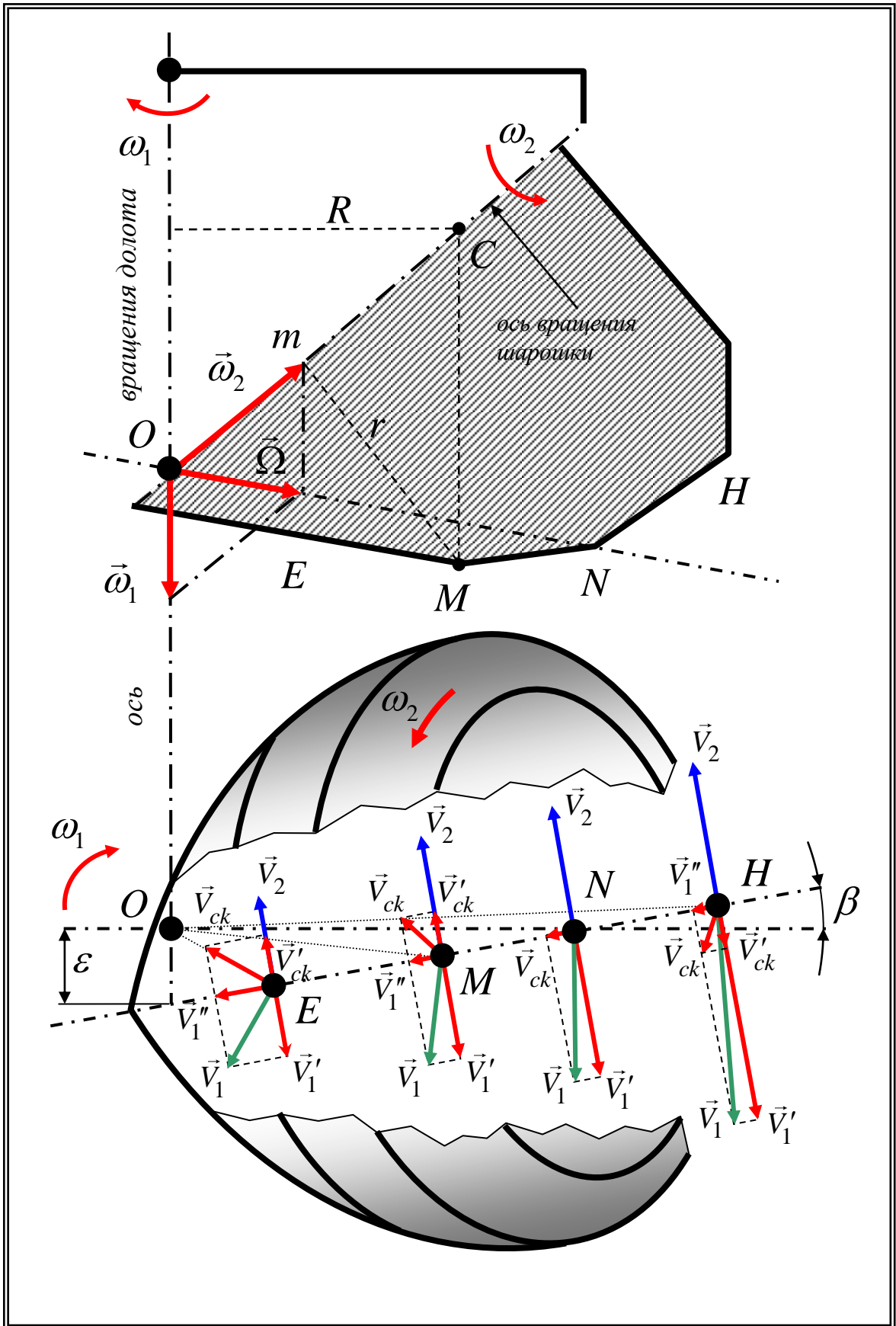


Рисунок 2.2 - Схема движения гладкой многоконусной шарошки с угловым смещением оси вращения в плане.

шарошки (процесс пробуксовки). Соответственно точки, лежащие на образующей шарошки правее точки  $N$ , подтормаживаются.

Таким образом, для определения направления скорости скольжения  $\vec{V}_{CK}$  в любой точке образующей шарошки, находящейся в соприкосновении с поверхностью забоя, нужно сложить ее поперечную  $\vec{V}'_{CK}$  и продольную  $\vec{V}''_1 = \vec{V}'_{CK}$  составляющие.

Как видно (рисунок 2.1), относительная величина продольной составляющей скорости скольжения  $\vec{V}''_{CK}$ , зависит исключительно от величины эксцентриситета  $\varepsilon$  оси вращения шарошки и является постоянной для всех точек образующей шарошки:

$$\vec{V}''_1 = \vec{V}'_1 \sin \theta = MO\omega_1 \sin \theta = \omega_1 \varepsilon. \quad (2.1)$$

Поперечная составляющая скорости скольжения точек  $E, M, N, H$

$$\vec{V}'_{CK} = \vec{V}'_1 + \vec{V}'_2 = \omega_1 R - \omega_2 r. \quad (2.2)$$

Суммарная скорость скольжения по забою в точках  $E, M, N, H$  будет равна:

$$\vec{V}_{CK} = \sqrt{(V'_{CK})^2 + (V''_{CK})^2}. \quad (2.3)$$

Если оси шарошек смещены в плане на величину эксцентриситета  $\varepsilon$  по направлению вращения ШБИ, то продольная составляющая скорости скольжения ориентирована в сторону вершины шарошки, при этом суммарная скорость скольжения имеет отклонение к центру вращения ШБИ.

Угол -  $\psi$ , образованный между направлением суммарной скорости скольжения и образующей шарошки в точках  $E, M, N, H$ , можно определить как [48]

$$\psi = \arctg \frac{V'_{CK}}{V''_{CK}} = \frac{R - ir}{e}. \quad (2.4)$$

Как известно, величина передаточного отношения между шарошкой и ШБИ  $i = \frac{\omega_2}{\omega_1}$  не находится в зависимости от значения эксцентриситета  $\varepsilon$ . Поэтому при исследовании кинематики ШБИ, оснащенного шарошками со смещенными осями, его можно рассматривать как инструмент, оснащенный шарошками с пересекающимися осями, при этом дополнительно наложив продольные скольжения в зависимости от величины эксцентриситета [50, 151].

Определив направления и величины проскальзывания всех зубьев вооружения ШБИ, можно с достаточной точностью рассчитать величины площадей поражения забоя по горизонтали каждым из зубчатых элементов при его взаимодействии с породой.

На (рисунок 2.3.1) представлена схема поражения забоя в горизонтальной плоскости зубчатыми элементами вооружения шарошки, оснащенной стандартным прямозубым вооружением.

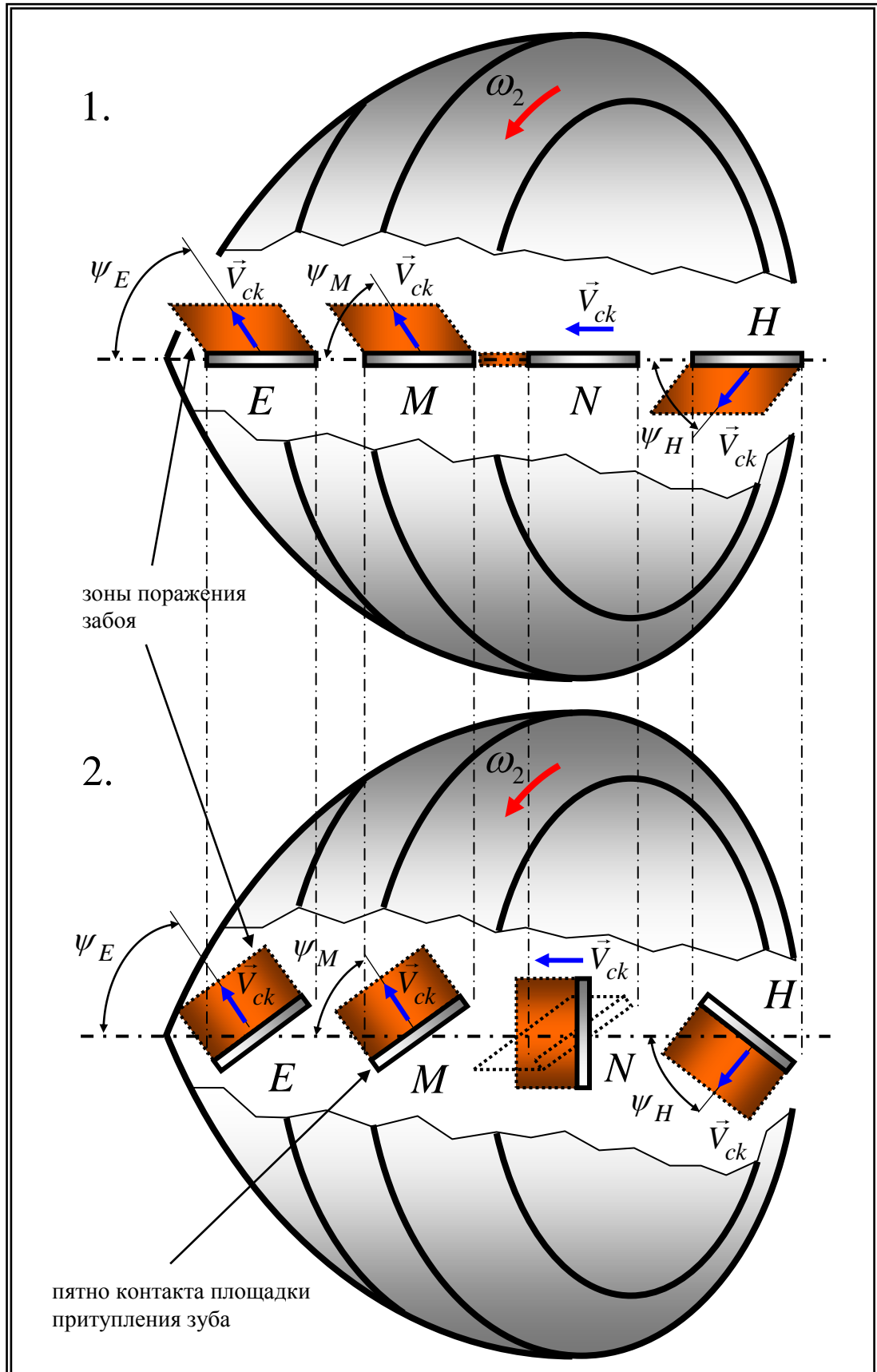


Рисунок 2.3 - Схема поражения заобя ПЗВ и КЗВ шарошек со смещенными осями.



В точках  $E, M$  и  $H$  следы, оставляемые зубьями вооружения на поверхности забоя по горизонтали, представляют собой параллелограммы, и только в точке  $N$  след имеет форму вытянутого прямоугольника.

Поэтому с целью увеличения площади поражения забоя зубчатым вооружением шарошек, при неизменном количестве и ширине венцов, нужно сориентировать зубья с таким расчетом, чтобы большие стороны их площадок притупления были перпендикулярны к направлению результирующей скорости скольжения (рисунок 2.3.2).

Для оценки прироста площади поражения забоя по горизонтали при работе КЗВ по отношению к прямозубому вооружению, в большинстве случаев необходимо определить разницы между площадями параллелограммов и прямоугольников (рисунок 2.4).

$S_1$  - площадь поражения забоя прямозубого вооружения, мм<sup>2</sup>;

$S_2$  - площадь поражения забоя КЗВ, мм<sup>2</sup>;

$\psi$  - угол между направлением результирующей скорости скольжения и осью шарошки, град.;

$L$  - длина площадки притупления косозубого вооружения, мм;

$l$  - длина площадки притупления прямозубого вооружения, мм;

$\Delta$  - величина проскальзывания, мм.

Исходя из (рисунок 2.4) можно определить, что:

$$S_1 = l\Delta \sin \psi . \quad (2.5)$$

$$S_2 = L\Delta = \frac{l\Delta}{\sin \psi} . \quad (2.6)$$

Тогда если  $S_1$  - площадь поражения забоя прямозубым вооружением, а  $S_2$  - косозубым, то их соотношение будет выглядеть следующим образом:

$$S_2 = \frac{S_1}{\sin^2 \psi} . \quad (2.7)$$

Например, для точек  $E, M$  и  $H$  при величине угла  $\psi = 60^\circ$  и площади  $S_1 = 1000$  мм<sup>2</sup> величина  $S_2$  будет равна

$$S_2 = \frac{1000}{\sin^2 60^\circ} = 1318 \text{ мм}^2 . \quad (2.8)$$

т.е. увеличение площади поражения забоя более чем на 30%.

При  $\psi = 30^\circ$  и площади  $S_1 = 1000$  мм<sup>2</sup>, величина  $S_2$  будет равна:

$$S_2 = \frac{1000}{\sin^2 30^\circ} = 4000 \text{ мм}^2 . \quad (2.9)$$

т. е. площадь поражения забоя увеличивается в 4 раза.

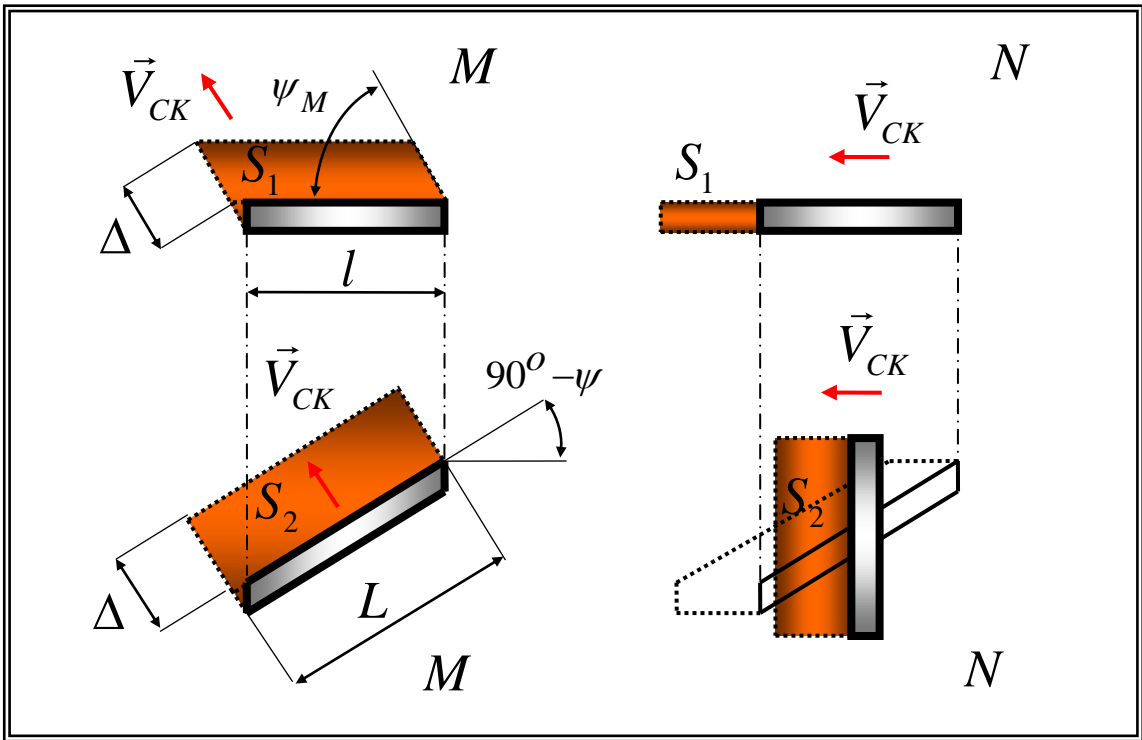


Рисунок 2.4 - Схема поражения заоя ПЗВ и КЗВ

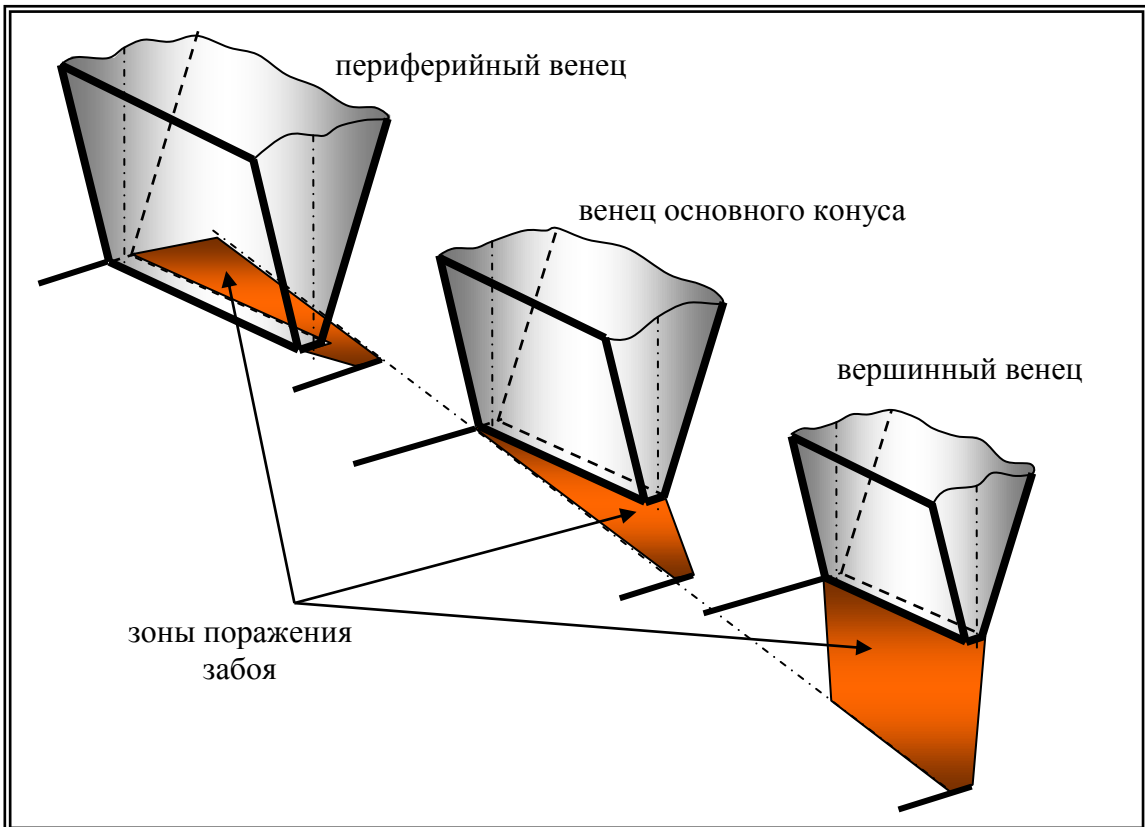


Рисунок 2.5 - Схема поражения заоя ПЗВ

Таким образом, можно констатировать, что чем меньше величина угла между направлением результирующей скорости скольжения и осью вращения шарошки, тем большего увеличения площади поражения забоя можно добиться за счет использования КЗВ вместо прямозубого вооружения.

В точке  $N$ , где результирующая скорость скольжения направлена (с некоторым допущением) по оси вращения и в сторону вершины шарошки, преимущество КЗВ является еще более очевидным, в связи с тем, что разрушение забоя прямозубым вооружением в этом месте происходит не основными рабочими гранями его зубьев, а лишь узкими профилями их торцевых поверхностей. Поэтому, чтобы достигнуть наибольшего увеличения площади поражения забоя КЗВ в горизонтальной плоскости, зубья его вооружения, располагающиеся в этой точке, нужно развернуть таким образом, чтобы большие стороны их площадок притупления были перпендикулярны оси шарошки.

Стандартное прямозубое вооружение ШБИ характеризуется тем, что большие стороны площадок притупления его зубьев направлены вдоль образующей и лежат в плоскости оси вращения шарошки (рисунок 2.5). Такая ориентация зубьев не обеспечивает максимального поражения и фрезерования забоя и тем самым не позволяет максимально использовать эффект проскальзывания зубчатого вооружения в процессе работы ШБИ.

Как отмечалось ранее, существует множество конструкций ШБИ, отдельные венцы которых оснащены зубьями, расположенными с правым или левым уклоном по отношению к образующим конусам шарошек, однако это не всегда обеспечивает повышение площади поражения забоя. Например, ШБИ со смещенными осями шарошек, вершинные венцы которого оснащены КЗВ с правым, по отношению к образующей шарошки, наклоном зубьев, не только не обеспечивает увеличение площади поражения забоя, а наоборот уменьшает ее, в сравнении с инструментом, оснащенным прямозубым вооружением.

На (рисунок 2.5) наглядно продемонстрировано, что проскальзывание зубьев на различных венцах вооружения шарошки имеет различные величины и направление. В связи с этим чтобы обеспечить увеличение площади поражения забоя, необходимо, чтобы зубья всех венцов вооружения были сориентированными под различными углами в соответствии с направлением их проскальзывания по забою.

При вращении ШБИ его шарошки «перекатываются» по забою, при этом зубья вооружения внедряются в породу и одновременно проскальзывают в ту или иную сторону относительно разрушаемой поверхности. Это воздействие на породу отдаленно напоминает процесс фрезерования и не только увеличивает скорость бурения, но и в немалой степени способствует выравниванию забоя [19]. Эффективность этого воздействия напрямую зависит от площади пораже-

ния забоя, увеличить которую возможно за счет строго определенной ориентации зубьев вооружения под определенным углом  $\psi$  для каждого из венцов шарошек ШБИ.

Увеличение механической скорости бурения может быть достигнуто только при обеспечении максимальной площади поражения забоя зубчатым вооружением ШБИ. Для этого необходимо, так сориентировать зубья вооружения шарошек, чтобы большие стороны их площадок притупления были перпендикулярны направлению результирующей скорости скольжения для каждого из венцов [74].

Таким образом, проведенное исследование взаимодействия КЗВ с забоем скважины при бурении мягких пород позволило установить, что у подавляющего большинства существующего ШБИ со смещенными в плане осями вращения шарошек ориентация зубьев вооружения не обеспечивает их эффективную работу в условиях повышенного скольжения. При этом было установлено, что для достижения увеличения площади поражения забоя необходимо располагать зубья вооружения под определенными углами по отношению к образующим шарошек. Наибольшая площадь поражения забоя по горизонтали и, соответственно производительность ШБИ, достигаются при геометрии зубчатого вооружения, когда большая сторона площадки притупления каждого зуба на каждом из венцов расположена под определенным углом к образующей шарошки, обеспечивающим ориентацию основных рабочих граней зубьев, строго перпендикулярно по отношению к направлению результирующей скорости их скольжения.

## **2.2 Исследование процесса взаимодействия косозубого вооружения с забоем скважины при бурении пород средней категории твердости**

Чтобы разработать более эффективную геометрию КЗВ ШБИ для разрушения средних пород, нужно точно определить направление и величину скольжения каждого из зубьев вооружения в процессе их взаимодействия с забоем скважины. Ранее отмечалось, что ШБИ, предназначенный для разбуривания средних пород, оснащается шарошками с многоконусным профилем, при этом оси вращения шарошек либо пересекаются, либо незначительно смещены относительно оси долота. Зубчатое вооружение изготавливается самоочищающимся [50].

Схема движения гладкой многоконусной шарошки с несмещенной осью вращения относительно центра ШБИ представлена на (рисунок 2.6), где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  - угловые скорости вращения долота и шарошки соответственно,  $c^{-1}$ .

Изучим особенности движения гладкой многоконусной шарошки по гладкому забою. Для начала определим положение мгновенной оси вращения по двум характерным точкам. Первая точка  $O$  - это место пересечения осей вращения ШБИ и шарошки. Вторая точка всегда

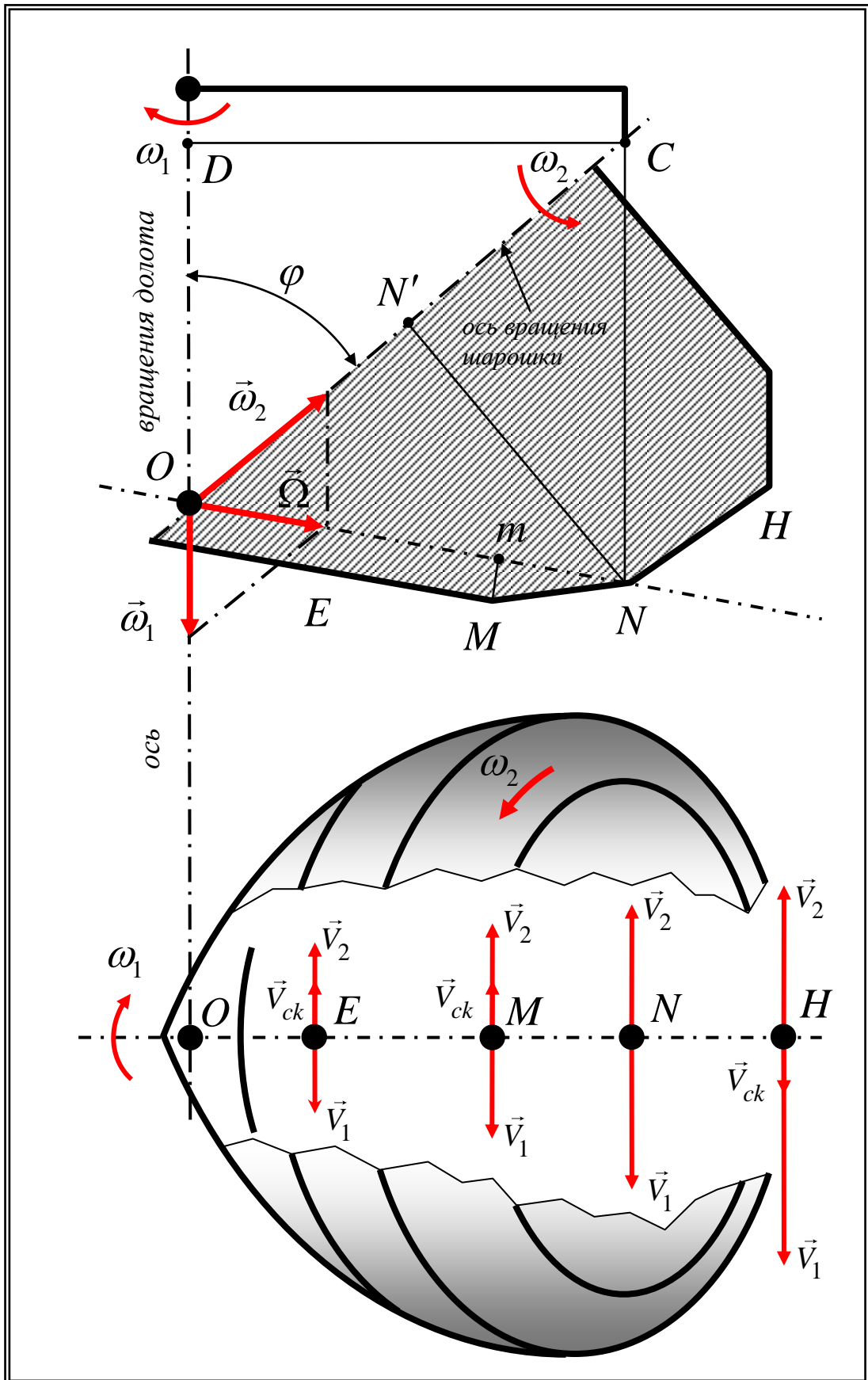


Рисунок 2.6 - Схема движения гладкой многоконусной шарошки

расположена на образующей шарошки, контактирующей с забоем (ее определение будет рассмотрено позже). Допустим, что это точка  $N$ . Задав положение мгновенной оси вращения, можно рассчитать скорость скольжения любой точки, лежащей на нижней образующей шарошки. Для начала графически определяется передаточное отношение между корпусом инструмента и шарошкой  $i = \frac{CD}{NN'}$ . Затем определяется угловая скорость вращения шарошки  $\omega_2 = i\omega_1$ , исходя из того, что угловая скорость вращения долота  $\omega_1$  известна. И в завершение определяется величина мгновенной угловой скорости вращения шарошки [48]

$$\Omega = \sqrt{\omega_2^2 + \omega_1^2 + 2\omega_2\omega_1 \cos \varphi}. \quad (2.10)$$

Определив расположение мгновенной оси вращения шарошки, можно вычислить скорость поперечного скольжения любой точки  $M$  по следующей формуле:

$$V_M = \Omega Mn. \quad (2.11)$$

Следовательно, чем дальше основные рабочие поверхности зубьев вооружения удалены от мгновенной оси вращения шарошки, тем выше скорость их поперечного проскальзывания по забою. При этом скольжение всех точек, лежащих на образующей слева от нескальзывающей или нейтральной точки  $N$ , будет осуществляться против направления вращения ШБИ, а справа от указанной точки – в противоположном направлении.

Как видно из (рисунок 2.6), переносные скорости  $\vec{V}_1$ , связанные с вращением ШБИ в точках  $E, M, N, H$ , лежащих на образующей в месте ее контакта с поверхностью забоя, будут направлены по ходу вращения инструмента и под прямым углом относительно радиуса вращения каждой из этих точек вокруг центра вращения ШБИ -  $O$ . В то же время, относительные скорости этих точек  $\vec{V}_2$  направлены по ходу вращения шарошки и под прямым углом к ее образующей или оси вращения. Абсолютные скорости точек  $E, M, N, H$  складываются из разности их скоростей в переносном (вращение ШБИ)  $\vec{V}_1$  и относительном (вращение шарошки)  $\vec{V}_2$  движениях и направлены под прямым углом к образующей шарошки.

В случае, показанном на (рисунок 2.6), относительная скорость -  $\vec{V}_2$  в точках  $E, M$ , превосходит величину скорости  $\vec{V}_1$ . Это связано с тем, что поперечная скорость скольжения в каждой из точек  $E, M$  представляет собой окружную скорость при вращении относительно мгновенной оси  $ON$  и направлена в обратную сторону по отношению к движению шарошки (процесс пробуксовки). Соответственно точки, лежащие на образующей шарошки правее точки  $N$ , подтормаживаются.

Определив направления и величины проскальзывания всех зубьев вооружения ШБИ, можно с достаточной точностью рассчитать величины площадей поражения забоя по горизонтали каждым из зубчатых элементов при его взаимодействии с породой.

На (рисунок 2.7.1) представлена схема поражения забоя в горизонтальной плоскости зубчатыми элементами вооружения шарошки, оснащенной стандартным ПЗВ.

В точках  $E, M$  и  $H$  следы, оставляемые зубьями вооружения на поверхности забоя по горизонтали, представляют собой прямоугольники, а в точке  $N$  проскальзывание равно нулю.

При замене прямозубого вооружения на КЗВ (рисунок 2.7.2), при неизменном количестве и ширине венцов, изменение суммарной площади поражения забоя не происходит, однако меняется форма следов от воздействия вооружения, которые трансформируются из прямоугольников в параллелограммы.

Как уже отмечалось ранее, стандартное прямозубое вооружение ШБИ характеризуется тем, что большие стороны площадок притупления его зубьев направлены вдоль образующей шарошки (рисунок 2.7.1). Такая ориентация зубьев не позволяет создать условия для обеспечения механической эвакуации шлама сквозь межзубное пространство из зоны непосредственного разрушения горной породы в процессе работы ШБИ. Это становится причиной многократного повторного измельчения шлама, что в свою очередь увеличивает износ вооружения ШБИ и в конечном итоге существенно снижает проходку и механическую скорость бурения.

Исследуем процессы, происходящие при разрушении породы забоя, зубьями шарошек, работающих в условиях проскальзывания вооружения. В процессе бурения шарошки ШБИ находятся под воздействием двух основных силовых факторов, это осевая нагрузка на инструмент, обеспечивающая внедрение зубьев в породу и крутящий момент, создаваемый приводом буровой установки, обеспечивающий вращение шарошек и режуще-скалывающее разрушение породы зубьями их вооружения.

Работа ШБИ, оснащенного прямозубым вооружением, особенностью геометрии которого, является расположение основных боковых рабочих граней зубьев, либо перпендикулярно, либо с минимальным отклонением по отношению к направлению усилия, создаваемого крутящим моментом, характеризуется тем, что усилие сдвига  $F$  не имеет тангенциальную составляющую и практически полностью задействовано на разрушение слоя породы в направлении движения зуба. Если основные рабочие поверхности зубьев образуют с направлением их проскальзывания и соответственно силой  $F$  некоторый угол, отличный от  $90^0$ , то разрушающее воздействие силы  $F$  раскладывается на две составляющие: нормальную  $F_n$  и касательную  $F_\tau$  (рисунок 2.8). При незначительных отклонениях от перпендикулярности величина нормальной составляющей  $F_n$  мало отличается от величины общего усилия  $F$ , а вот тангенциальная

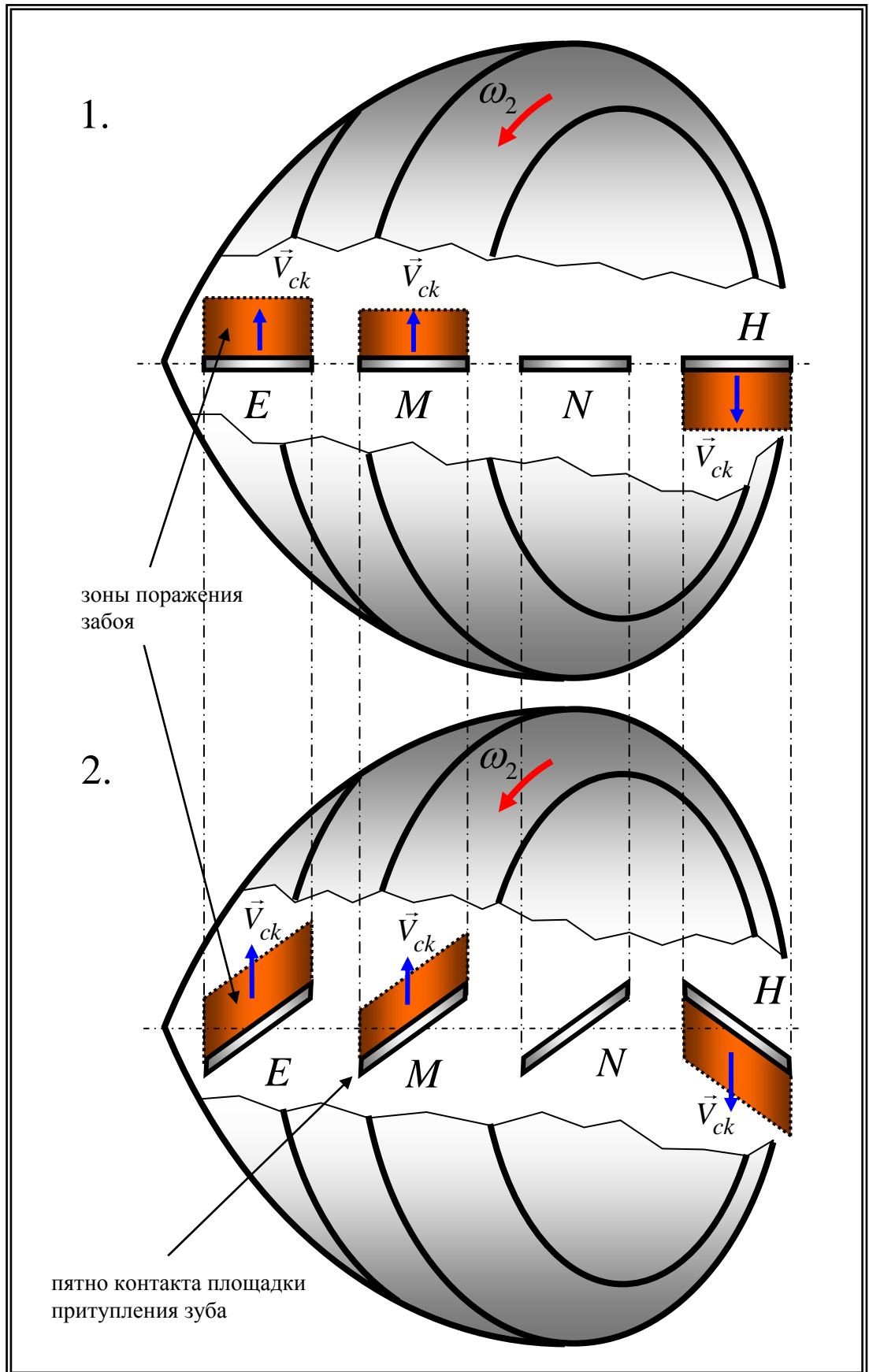


Рисунок 2.7 - Схема поражения забоя ПЗВ и КЗВ

шарошек с несмещенными осями.



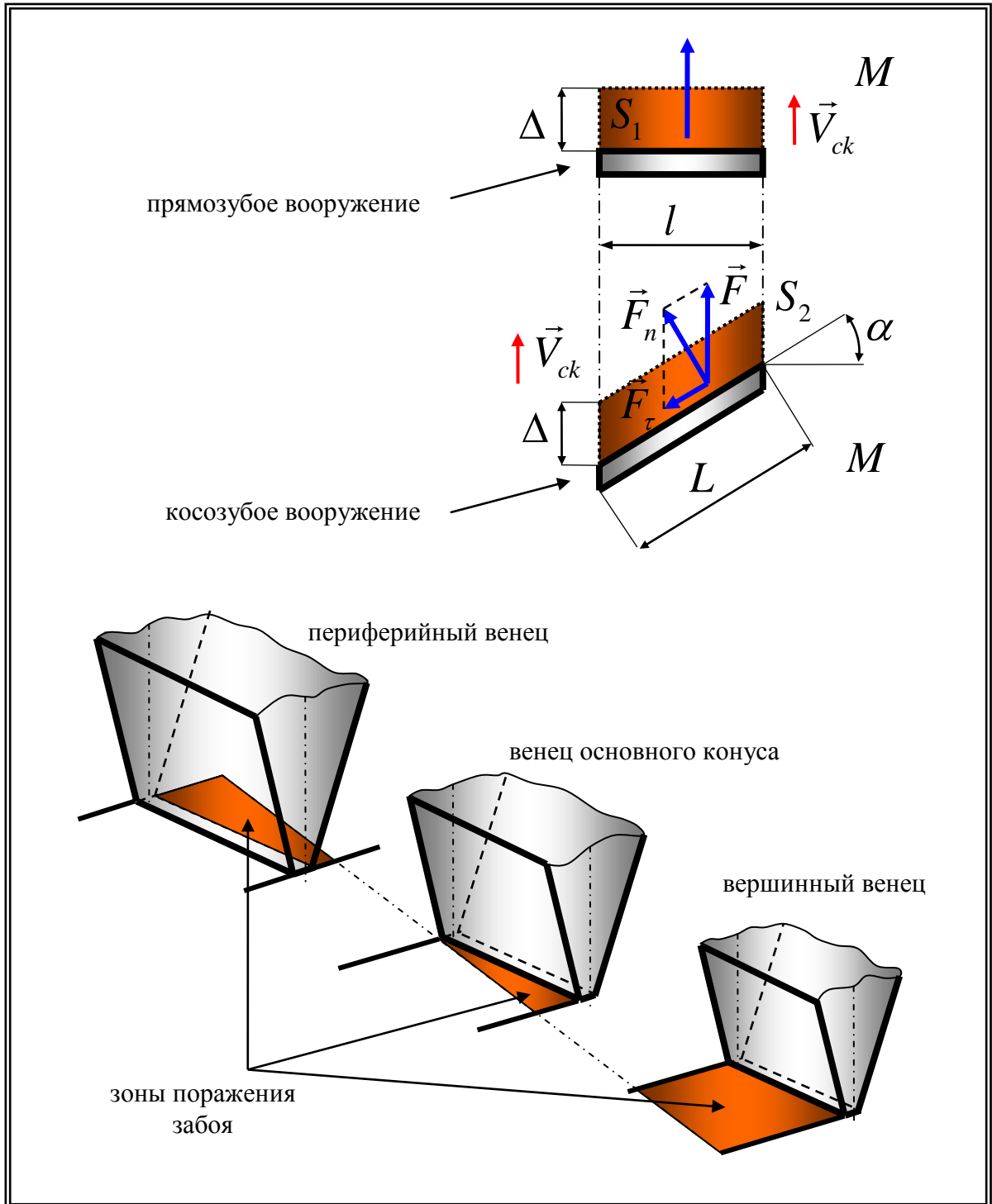


Рисунок 2.8 - Схема поражения забоя в горизонтальной плоскости  
зубьями вооружения шарошек бурового инструмента

составляющая  $F_r$ , существенно увеличивается.

В связи с этим при бурении ШБИ оснащенным КЗВ, при воздействии зубьев его вооружения на породу забоя с общим усилием  $F$ , за счет тангенциальной составляющей этого усилия  $F_r$ , образующейся вследствие наклона зубьев, разрушенная порода механически эвакуируется из межзубного пространства в сторону от направления проскальзывания вооружения. В результате каждый зубчатый элемент КЗВ ШБИ, представляющий собой винтовой сегмент, работает подобно миниатюрному шнеку.

Как известно, бурение горных пород ШБИ сопровождается образованием на забое достаточно шероховатой поверхности, имеющей большое количество выступов и впадин. Многочисленные исследования по моделированию забоя с проточками различной геометрии позволили установить, что чем больше шероховатость поверхности, тем ниже эффективность очистки забоя поперечными потоками промывочной жидкости [94].

Поэтому, чтобы повысить эффективность промывки призабойной зоны, необходимо как можно лучше выравнивать поверхность забоя за счет повышения фрезерующего эффекта вооружения ШБИ, обеспечиваемого определенной геометрией вооружения шарошек. В связи с этим основные винтообразные поверхности зубьев КЗВ, аналогично косозубым цилиндрическим фрезам, гораздо чище обрабатывают поверхность забоя. Это позволяет существенно улучшить очистку призабойной зоны от выбуренной породы и предотвращать ее повторное измельчение.

Таким образом, проведенное исследование взаимодействия КЗВ с забоем скважины при бурении пород средней твердости позволило установить, что оснащение КЗВ шарошек с минимальным или нулевым смещением осей их вращения относительно центра ШБИ не дает возможности увеличить общую площадь поражения забоя. Однако использование КЗВ позволяет повысить эффективность удаления шлама путем его механической эвакуации сквозь межзубное пространство из зоны непосредственного разрушения горной породы, а также улучшить выравнивание поверхности забоя за счет повышения фрезерующего эффекта КЗВ ШБИ.

### **2.3 Математическое моделирование процесса перекачивания шарошки бурового инструмента при бурении мягких и средних пород**

Как отмечалось ранее, ШБИ ударно-режущего действия, предназначенный для разбуривания мягких пластичных и средних пород оснащается шарошками с многоконусным профилем, при этом оси вращения шарошек смещены относительно оси долота. Особенностью ШБИ данного типа является наличие скольжения зубьев вооружения при перемещении шарошек по

поверхности забоя, а также при образовании стенки скважины. При этом используется так называемое «самоочищающееся» вооружение шарошек [50].

Смещение осей вращения шарошек относительно оси вращения ШБИ дает возможность при работе инструмента добиться дополнительного продольного скольжения контактирующих с забоем зубьев вооружения, которое совместно с другими факторами позволяет увеличить суммарную величину проскальзывания вооружения. Величина этой составляющей суммарной скорости скольжения напрямую зависит от величины смещения - чем больше смещение, тем больше скорость. Повышение проскальзывания и как следствие, режущей составляющей в работе зубчатого вооружения ШБИ позволяет значительно повысить эффективность бурения пластичных пород [48].

Изучение принципов и исследование основных закономерностей процесса «перекатывания» шарошки ШБИ по деформируемому забою, а также математическое моделирование этого процесса позволят повысить качество проектирования и создания новых конструкций зубчатого вооружения ШБИ, позволяющих повысить технико-экономические показатели бурения ШБИ.

Рассмотрим процесс «перекатывания» шарошки по «мягкому» забою с проскальзыванием. На (рисунок 2.9) представлена упрощенная схема «перекатывания» зубчатого венца шарошки ШБИ когда в каждый момент времени, по меньшей мере, три зубчатых элемента находятся во взаимодействии с породой забоя. При этом проскальзывание по направлению вращения ШБИ, называется подтормаживание, а против – пробуксовка. На первый взгляд, нет никакой разницы в площади поражения забоя в вертикальной плоскости при этих двух видах проскальзывания. Однако разберем подробнее каждый из этих случаев.

На (рисунок 2.10) представлены схемы траекторий движения вершины зуба в случае: 1. подтормаживания; 2. чистого перекатывания; 3. пробуксовки, где  $h$  – величина максимального углубления зуба, мм;  $V_{СК}$  – скорость скольжения зубьев вооружения по забою, м/с.

На (рисунок 2.10) представлены траектории движения вершины зуба при перекатывании шарошки, в трех разных случаях. Как видно из рисунка, зоны поражения забоя в вертикальной плоскости во всех этих случаях абсолютно разные, а значит, и эффективность разрушения забоя.

Для определения конструктивных параметров зубчатого вооружения ШБИ нужно исследовать кинематику шарошки и изучить механику воздействия зубьев ее вооружения на деформируемый забой в процессе работы ШБИ.

С целью решения этой проблемы была разработана математическая модель, позволяющая отслеживать траекторию движения любой точки вооружения шарошки во время ее перекатывания по забою [104].

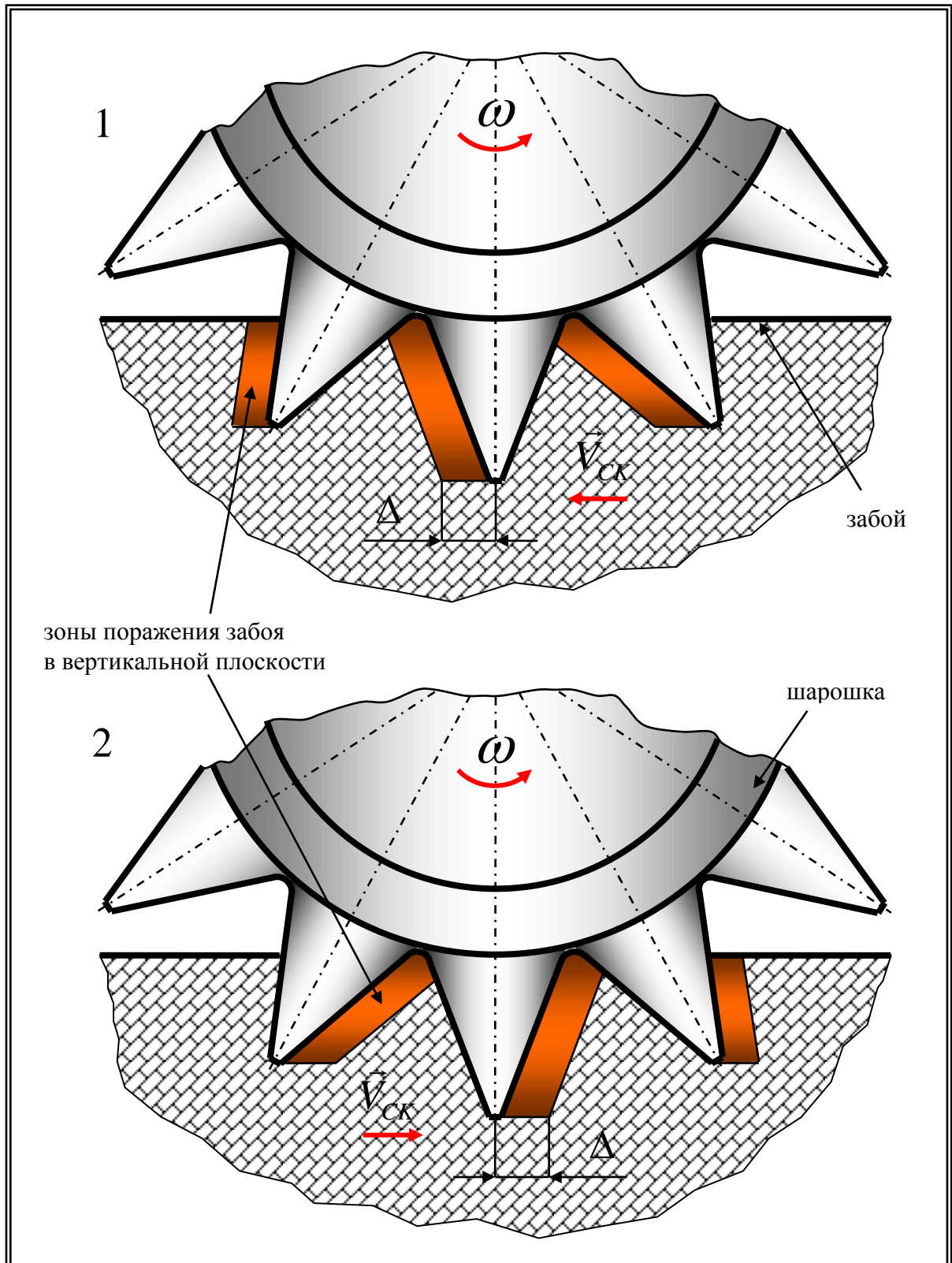


Рисунок 2.9 - Принципиальная схема проскальзывания зубьев долота по забойу

1 - подтормаживание; 2 – пробуксовка

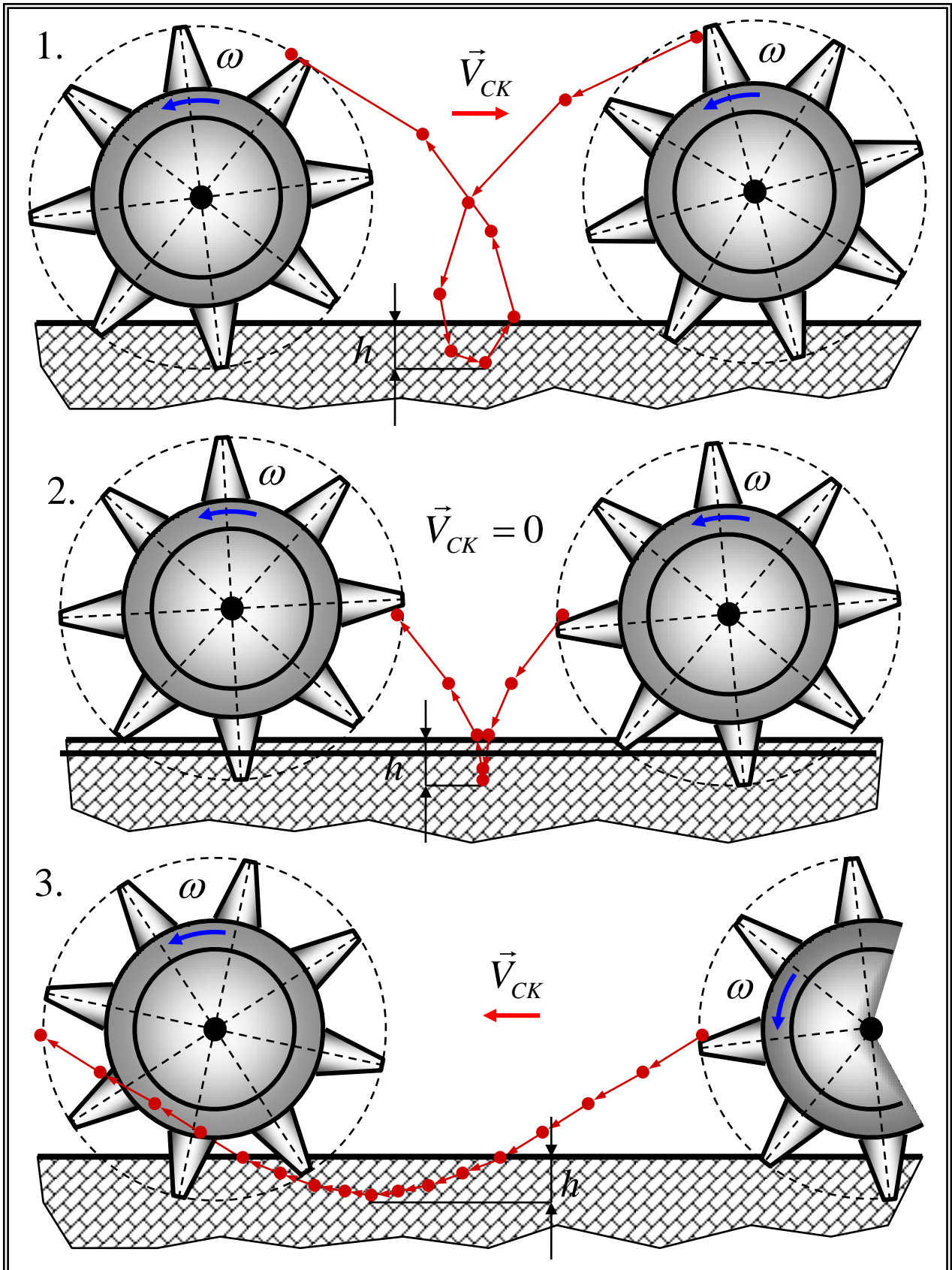


Рисунок 2.10 - Траектория движения вершины зуба в процессе перекатывания шарошки

1 - при пробуксовке вооружения; 2 - при чистом качении;

3 - при подтормаживании вооружения

Для примера, рассчитаем траекторию движения точки  $M$ , находящейся на пересечении калибрующего и основного конусов шарошки ШБИ (рисунок 2.11).

$$O\vec{M} = O\vec{A} + A\vec{B} + B\vec{M}. \quad (2.12)$$

В процессе движения шарошки вокруг оси вращения ШБИ

$$\varphi_2 = \omega_2 t; \varphi_1 = \omega_1 t. \quad (2.13)$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  - угловые скорости вращения шарошки и ШБИ, соответственно,  $c^{-1}$ ;

В результате:

$$O\vec{A} = [k \cos(\omega_2 t) - l \sin \beta \sin(\omega_2 t), -k \sin(\omega_2 t) - l \sin \beta \cos(\omega_2 t), 0]; \quad (2.14)$$

$$A\vec{B} = [AB \sin(\omega_2 t) \sin \beta, AB \cos(\omega_2 t) \sin \beta, AB \cos \beta]. \quad (2.15)$$

где  $\beta$  - угол, образованный между осью шарошки и ее образующей, град.;  $k$  - эксцентриситет оси вращения шарошки, мм;  $l$  - смещение вершинной части шарошки, мм.

Повернем основание конуса шарошки вокруг осей  $OZ$ ,  $OY$  и определим вектор  $B\vec{M}$

$$\begin{cases} X'_M = BM \sin(\omega_1 t) \\ Y'_M = BM \cos(\omega_1 t) \\ Z'_M = 0 \end{cases}. \quad (2.16)$$

Затем осуществим поворот на угол  $180^\circ - \beta$  вокруг оси  $X_1$ , используя матрицу преобразования:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & -\cos \beta \end{vmatrix}; \text{тогда: } \begin{cases} X''_M = X'_M \\ Y''_M = -Y'_M \cos \beta \\ Z''_M = Y'_M \sin \beta \end{cases}. \quad (2.17)$$

Осуществим поворот вокруг оси  $Z$  на угол  $-\varphi_2 = -\omega_2 t$ .

Воспользуемся матрицей преобразования:

$$\begin{vmatrix} \cos(\omega_2 t) & \sin(\omega_2 t) & 0 \\ -\sin(\omega_2 t) & \cos(\omega_2 t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} X'''_M = X''_M \cos(\omega_2 t) + Y''_M \sin(\omega_2 t) \\ Y'''_M = -X''_M \sin(\omega_2 t) + Y''_M \cos(\omega_2 t) \\ Z'''_M = Z''_M \end{cases} \begin{cases} X'''_M = X'_M \cos(\omega_2 t) - Y'_M \sin(\omega_2 t) \cos \beta \\ Y'''_M = -X'_M \sin(\omega_2 t) - Y'_M \cos(\omega_2 t) \cos \beta \\ Z'''_M = Y'_M \sin \beta \end{cases}. \quad (2.19)$$

$$\begin{cases} X'''_M = BM \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) - BM \cos(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) \cos \beta \\ Y'''_M = -BM \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) - BM \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) \cos \beta \\ Z'''_M = BM \cos(\omega_1 t) \sin \beta \end{cases}. \quad (2.20)$$

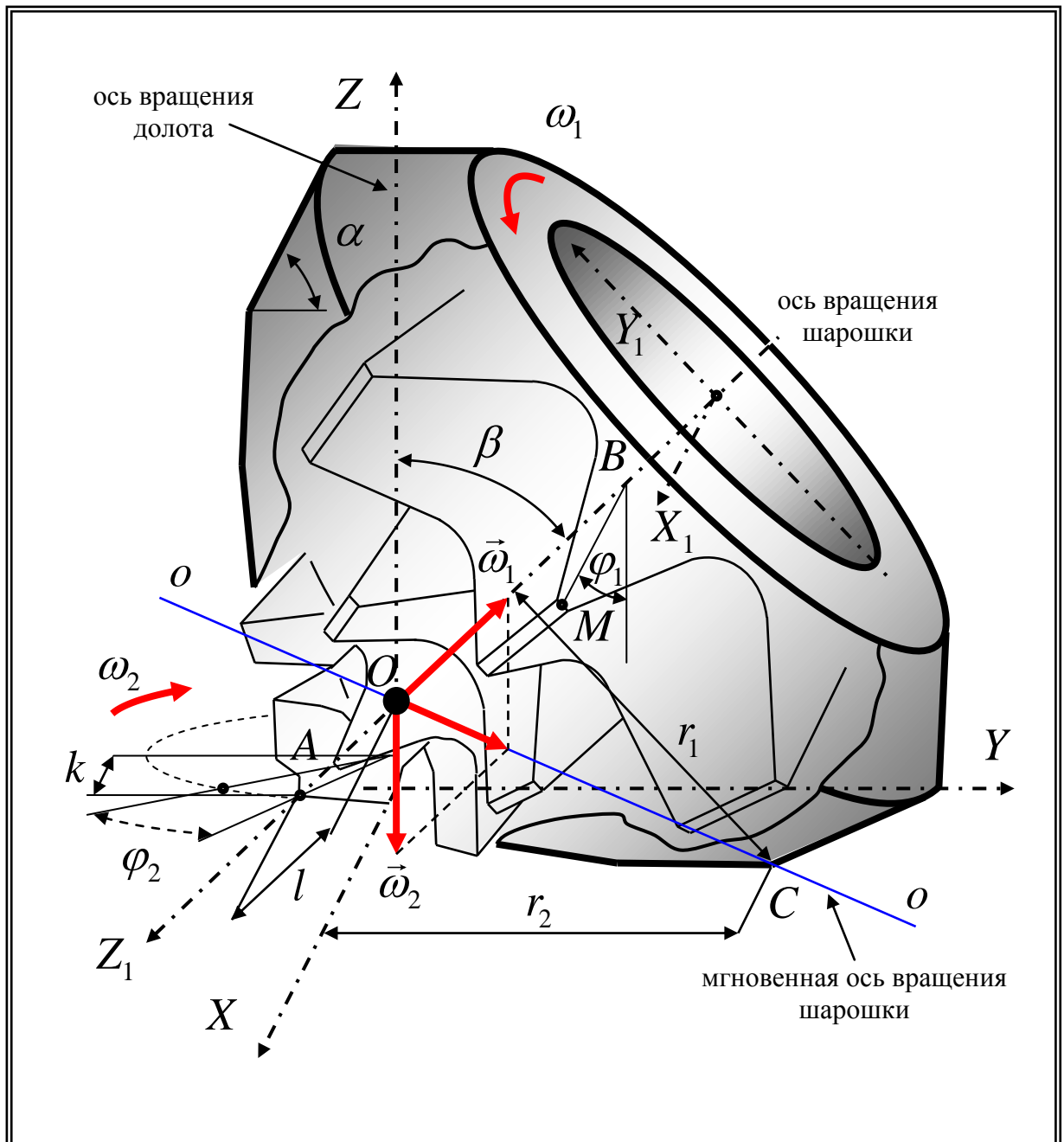


Рисунок 2.11 - Расчетная схема

Найдем абсолютные координаты точки  $M$ , используя векторы  $\vec{OA}$ ,  $\vec{AB}$ .

$$\begin{cases} X_M = k \cos(\omega_2 t) - l \sin \beta \sin(\omega_2 t) + AB \sin(\omega_2 t) \sin \beta + BM \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) - \\ - BM \cos(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) \cos \beta \\ Y_M = -k \sin(\omega_2 t) - l \sin \beta \cos(\omega_2 t) + AB \cos(\omega_2 t) \sin \beta - BM \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) - \\ - BM \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) \cos \beta \\ Z_M = AB \cos \beta + BM \cos(\omega_1 t) \sin \beta \end{cases} \quad (2.21)$$

На основе разработанной математической модели было проведено моделирование траекторий движения различных точек вооружения ШБИ в процессе его вращения на забое [94, 104]. Результаты приведены на (рисунок 2.12).

Данные в целом подтверждают существующее представление о характере движения элементов вооружения шарошек при работе бурового долота. Однако использование данной математической модели позволяет увидеть объемную картину траектории движения, быстро и точно определять несоответствие геометрии вооружения характеру и условиям взаимодействия его с забоем в каждом конкретном случае. Например, благодаря модели можно отслеживать, где и на каком венце происходит перекрытие зон поражения забоя соседними зубьями, а где имеется склонность к рейкообразованию и т. д.

Таким образом, математическое моделирование процесса перекачивания шарошки бурового инструмента при бурении позволило определить и построить в трехмерном пространстве траектории движения всех зубьев каждого из венцов шарошечного бурового долота. В результате было установлено, что вершинные венцы шарошек работают с пробуксовкой вооружения, а периферийный с подтормаживанием, при этом существует некий средний (ведущий) венец вооружения, зубья которого работают без скольжения.

## **2.4 Исследование процесса проскальзывания зубьев вооружения шарошечного бурового инструмента**

Для определения основных направлений совершенствования зубчатого вооружения ШБИ с целью повышения эффективности его работы необходимо провести исследование процесса проскальзывания зубьев вооружения ШБИ при «перекачивании» его шарошек по деформируемому забою [101, 106].

Суть процесса «перекачивания» шарошки со смещенной осью вращения относительно оси ШБИ, в условиях деформируемого забоя, заключается в том, что зубья вооружения шарошки не только внедряются в породу на определенную глубину, но и одновременно проскальзывают в том или ином направлении.



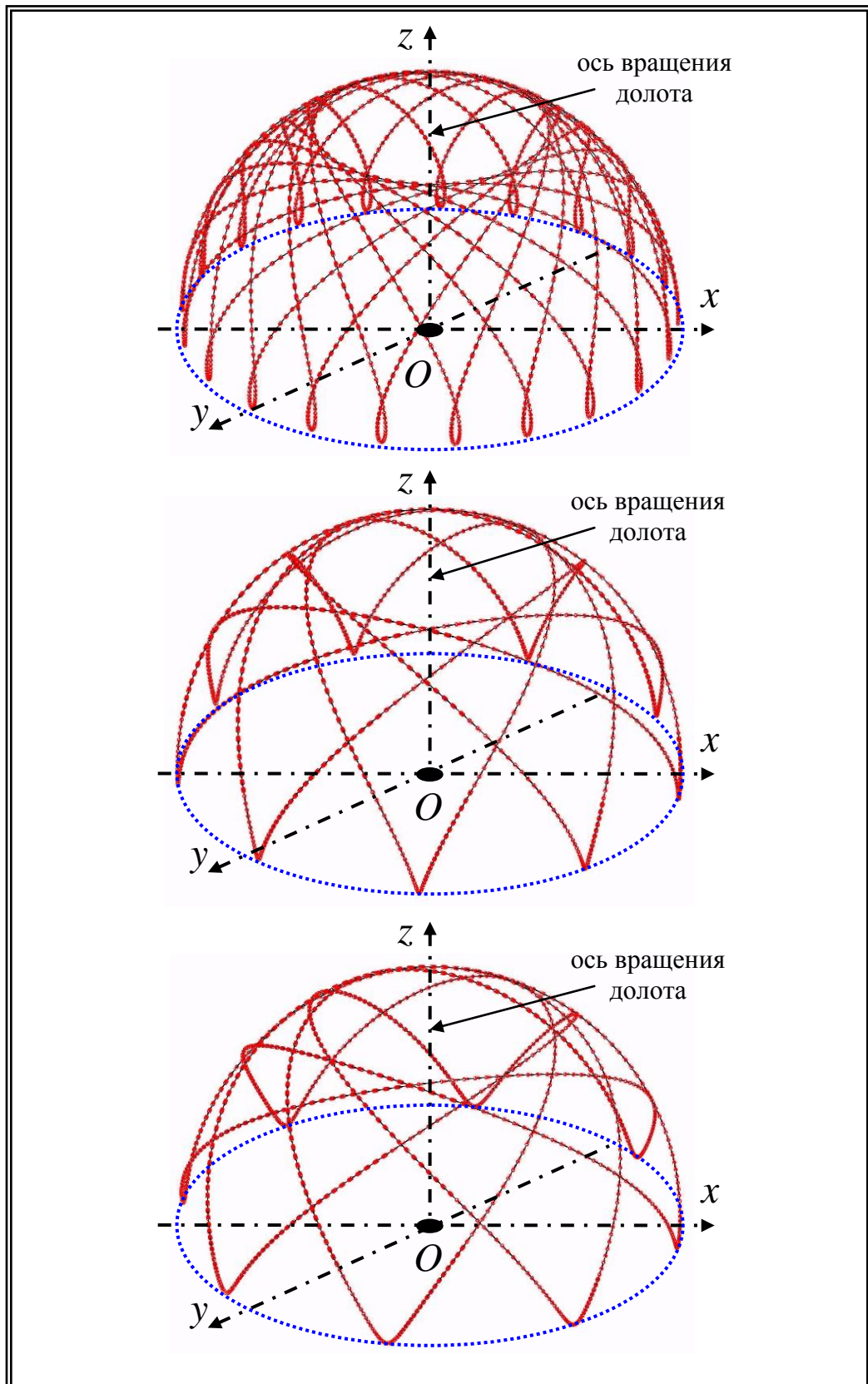


Рисунок 2.12 - Траектории движения вершины зуба вооружения, полученные в результате математического моделирования «перекачивания» шарошки бурового долота по забоя:

1 - пробуксовка, 2 - чистое перекачивание, 3 – подтормаживание

Чтобы определить, что является более эффективным с точки зрения разрушения породы, работа подтормаживающих или пробуксовывающих зубьев вооружения ШБИ, нужно исследовать кинематику шарошки и изучить механику воздействия зубьев ее вооружения, в том и другом случае, на деформируемый забой в процессе работы ШБИ.

На (рисунок 2.13) представлены принципиальная схема пробуксовки вооружения и зона поражения забоя зубьями ШБИ в вертикальной плоскости, а на (рисунок 2.14) аналогичная схема, только для подтормаживающего вооружения.

С целью обеспечения корректности сравнения все геометрические характеристики вооружения, величины внедрения зубьев в поверхность забоя, а также угловые величины проворота и недоворота венца шарошки для обоих процессов идентичны.

Визуальный анализ «выбуренных» зон свидетельствует о том, что площадь поражения забоя в вертикальной плоскости при пробуксовке зубчатого вооружения существенно меньше, чем при подтормаживании.

Для того, чтобы точно оценить, какой из двух процессов - подтормаживание или пробуксовка - является более эффективным, нужно вычислить разницу площадей поражения забоя в вертикальной плоскости зубьями вооружения ШБИ для обоих процессов.

Схема для определения площади поражения забоя зубом подтормаживающего вооружения шарошки в вертикальной плоскости представлена на (рисунок 2.15.1).

Для того чтобы вычислить площадь поражения забоя (по вертикали), нужно определить площадь фигуры OABCD.

Сначала последовательно определим  $X$  и  $Y$  координаты для каждого из четырех положений вершины зуба в процессе формирования лунки в поверхности забоя.

$$\begin{aligned} y_0 &= 0; & x_0 &= h; \\ y_1 &= \frac{2}{3} \frac{\pi r \beta}{180} - r \sin \frac{1}{3} \beta; & x_1 &= h - r \left( 1 - \cos \frac{1}{3} \beta \right); \\ y_2 &= \frac{\pi r \beta}{180} - r \sin \frac{2}{3} \beta; & x_2 &= h - r \left( 1 - \cos \frac{2}{3} \beta \right); \\ y_3 &= \frac{4}{3} \frac{\pi r \beta}{180} - r \sin \beta; & x_3 &= 0; \end{aligned}$$

Где

$h$  - величина максимального углубления зуба в поверхность забоя, мм;

$\beta$  - угол, образованный между осями двух смежных зубьев, град.;

$r$  - радиус венца шарошки ШБИ, мм;

$l$  - длина дуги вершины зуба при повороте на  $1/3 \beta$  относительно оси шарошки.

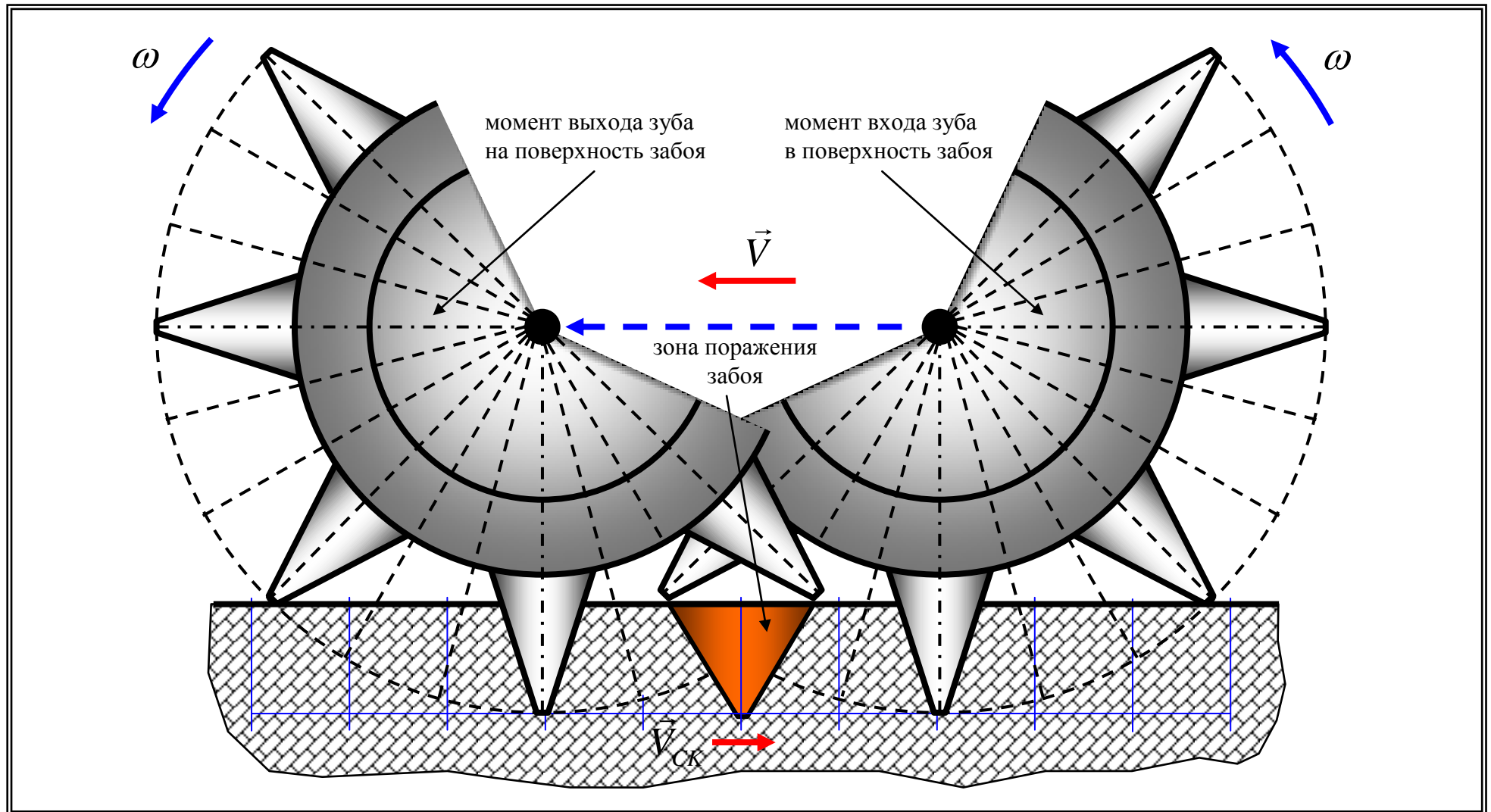


Рисунок 2.13 - Принципиальная схема пробуксовки вооружения и зона поражения заоя

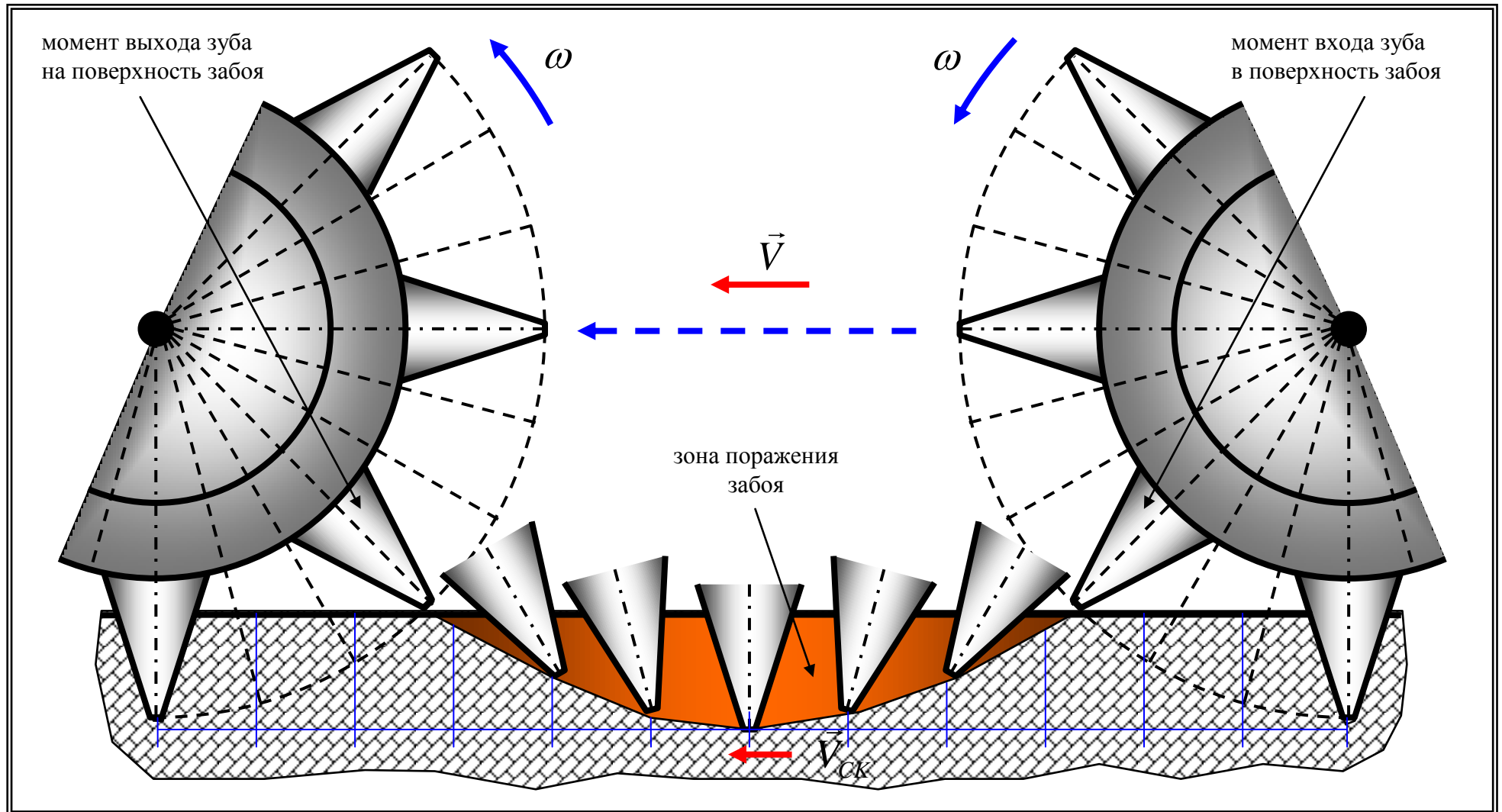


Рисунок 2.14 - Принципиальная схема подтормаживания вооружения и зона поражения заоя

Определим площадь фигуры  $OC'D$  по формуле

$$S_1 = \frac{1}{2}(x + x_1)y_1 = \frac{1}{2} \left[ h + h - r \left( 1 - \cos \frac{1}{3} \beta \right) \right] \left[ \frac{2}{3} \frac{\pi r \beta}{180} - r \sin \frac{1}{3} \beta \right]. \quad (2.22)$$

Определим площадь фигуры  $CC'B'B$  по формуле

$$\begin{aligned} S_2 &= \frac{1}{2}(x_1 + x_2)(y_2 - y_1) = \\ &= \frac{1}{2} \left[ h - r \left( 1 - \cos \frac{1}{3} \beta \right) + h - r \left( 1 - \cos \frac{2}{3} \beta \right) \right] \left[ \frac{\pi r \beta}{180} - r \sin \frac{2}{3} \beta - \frac{2}{3} \frac{\pi r \beta}{180} + r \sin \frac{1}{3} \beta \right]. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Определим площадь треугольника  $BB'A$  по формуле

$$S_3 = \frac{1}{2}x_2(y_3 - y_2) = \frac{1}{2} \left[ h - r \left( 1 - \cos \frac{2}{3} \beta \right) \right] \left[ \frac{4}{3} \frac{\pi r \beta}{180} - r \sin \beta - \frac{\pi r \beta}{180} + r \sin \frac{2}{3} \beta \right]. \quad (2.24)$$

Тогда общая площадь поражения забоя (по вертикали) зубом венца, работающего в режиме подтормаживания, равна удвоенной величине площади фигуры  $OABCD$ , которая в свою очередь складывается из суммы ранее определенных площадей фигур  $OC'D$ ,  $CC'B'B$  и  $BB'A$ :

$$S_I = 2(S_1 + S_2 + S_3); \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} S_I &= \left[ 2h - r \left( 1 - \cos \frac{1}{3} \beta \right) \right] \left[ \frac{\pi r \beta}{270} - r \sin \frac{1}{3} \beta \right] + \\ &+ \left[ 2h - r \left( 2 - \cos \frac{1}{3} \beta - \cos \frac{2}{3} \beta \right) \right] \left[ \frac{\pi r \beta}{540} - r \left( \sin \frac{2}{3} \beta - \sin \frac{1}{3} \beta \right) \right] + \\ &+ \left[ h - r \left( 1 - \cos \frac{2}{3} \beta \right) \right] \left[ \frac{\pi r \beta}{540} - r \left( \sin \beta - \sin \frac{2}{3} \beta \right) \right] \end{aligned} \quad (2.26)$$

Схема для определения площади поражения забоя зубом пробуксовывающего вооружения шарошки в вертикальной плоскости представлена на (рисунок 2.15.2).

Для того чтобы вычислить площадь поражения забоя (по вертикали), нужно определить площадь фигуры  $OMN$ .

Сначала определяем величину

$$k = r \sin \beta. \quad (2.27)$$

затем величину  $ON$ :

$$ON = k - \frac{2}{3} \frac{\pi r \beta}{180} = r \left( \sin \beta - \frac{\pi \beta}{270} \right). \quad (2.28)$$

Далее определим площадь треугольника  $OMN$  по формуле

$$S_{OMN} = \frac{1}{2} rh \left( \sin \beta - \frac{\pi \beta}{270} \right). \quad (2.29)$$

Тогда суммарная площадь поражения забоя при пробуксовке вооружения будет равна

$$S_{II} = rh \left( \sin \beta - \frac{\pi \beta}{270} \right). \quad (2.30)$$

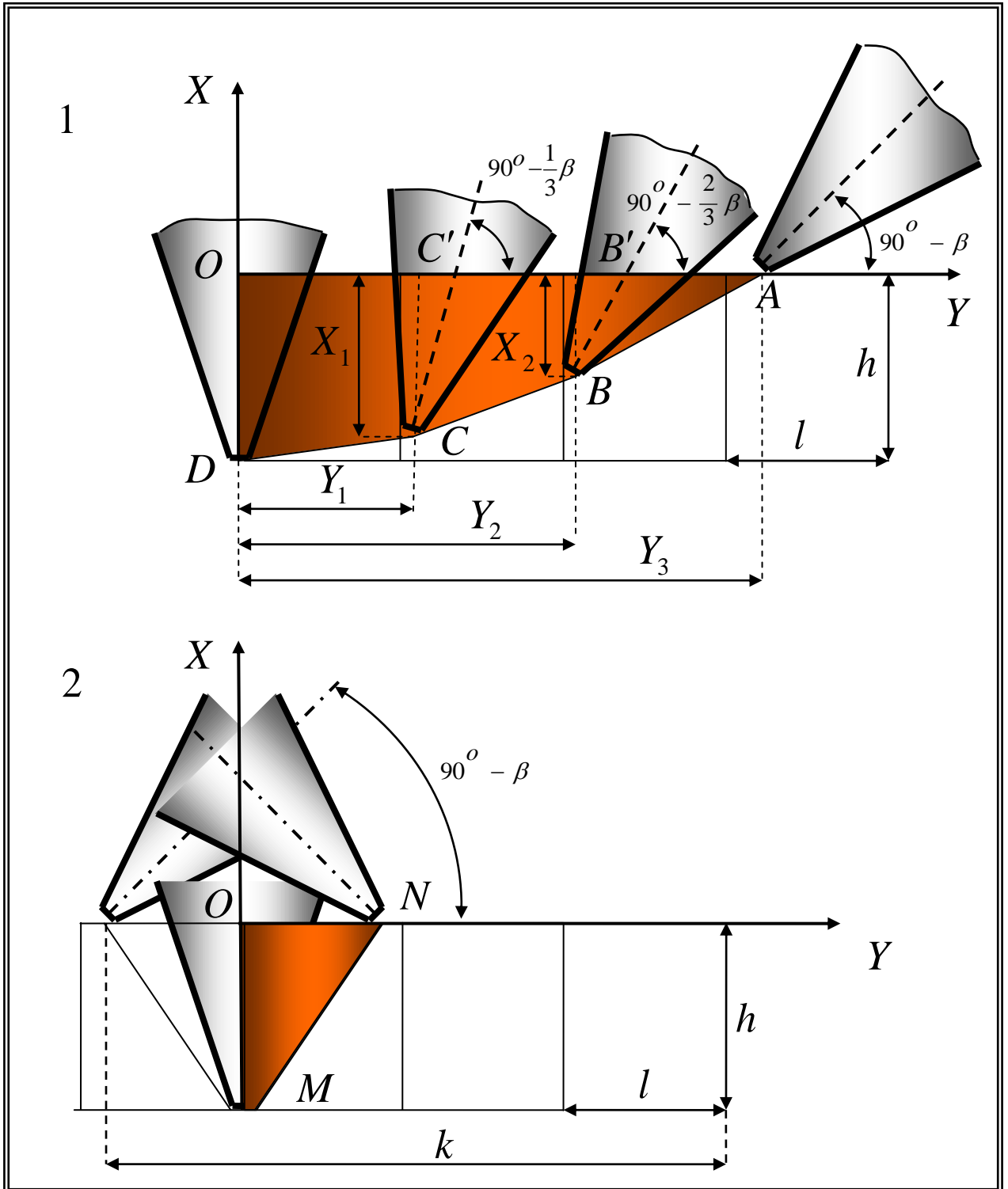


Рисунок 2.15 - Схема для определения площади поражения зубья  
 зубом вооружения шарошки в вертикальной плоскости  
 1 - при подтормаживании; 2 - при пробуксовке

В результате можно определить разницу площадей поражения забоя при подтормаживании и пробуксовки зуба вооружения ШБИ в вертикальной плоскости:

$$\begin{aligned}
 S_{\Delta} = S_I - S_{II} = & \left[ 2h - r \left( 1 - \cos \frac{1}{3} \beta \right) \right] \left[ \frac{\pi r \beta}{270} - r \sin \frac{1}{3} \beta \right] + \\
 & + \left[ 2h - r \left( 2 - \cos \frac{1}{3} \beta - \cos \frac{2}{3} \beta \right) \right] \left[ \frac{\pi r \beta}{540} - r \left( \sin \frac{2}{3} \beta - \sin \frac{1}{3} \beta \right) \right] + \\
 & + \left[ h - r \left( 1 - \cos \frac{2}{3} \beta \right) \right] \left[ \frac{\pi r \beta}{540} - r \left( \sin \beta - \sin \frac{2}{3} \beta \right) \right] - rh \left( \sin \beta - \frac{\pi \beta}{270} \right)
 \end{aligned} \quad (2.31)$$

Для представленных на (рисунок 2.13) и (рисунок 2.14) случаев пробуксовывающего и подтормаживающего зубчатого вооружения ШБИ на одинаковую угловую величину соотношение площадей будет равно

$$S_I = 2,9 S_{II}. \quad (2.32)$$

Таким образом, проведенные исследования проскальзывания зубьев вооружения шарошек по забоям позволили установить, что процесс пробуксовки зубчатого вооружения ШБИ с точки зрения площади поражения забоя в вертикальной плоскости является гораздо менее эффективным, чем процесс подтормаживания.

## **2.5 Методика определения положения мгновенной оси вращения шарошки бурового инструмента в процессе его работы**

Совершенствование существующих и разработка новых конструкций зубчатого вооружения шарошек с целью повышения эффективности его работы практически невозможны без знания кинематики ШБИ.

Изучению кинематики ШБИ посвящено множество экспериментальных и теоретических исследований. Так, экспериментальные исследования позволили установить, что средние передаточные отношения шарошек, в условиях установившегося режима работы ШБИ, от оборота к обороту изменяются незначительно. Существенное влияние на средние и точные передаточные отношения шарошек оказывает изменение осевой нагрузки на инструмент, в то время как изменение частоты его вращения влияет незначительно [1, 6, 7].

подавляющее большинство существующих на сегодняшний день теоретических методик расчета передаточного отношения системы «корпус ШБИ – шарошка» разработаны на основе допущения о недеформируемости забоя, т. е. абсолютно не учитывают важную составляющую процесса разрушения породы, а именно внедрение зубьев вооружения в поверхности забоя при работе ШБИ.

Наиболее объективной и точной методикой определения положения мгновенной оси вращения шарошки, работающей с проскальзыванием ее вооружения, является методика, базирующаяся на принципе минимальной затраты мощности [160, 161]. Данная методика заключается в выявлении венца шарошки, зубчатое вооружение которого работает без проскальзывания относительно забоя, т. е. венца чистого качения или ведущего венца, из условия одинаковости работ, осуществляемых зубьями проскальзывающего вооружения шарошки по разные стороны от выявляемого венца:

$$\left. \begin{aligned} \left| \sum_{j=1}^m A_j z_j \right| - \left| \sum_{j=m+1}^n A_j z_j \right| < 0 \\ \left| \sum_{j=1}^{m+1} A_j z_j \right| - \left| \sum_{j=m+2}^n A_j z_j \right| > 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.33)$$

где  $n$  - число венцов на шарошке;  $z_j$  - число зубьев вооружения на отдельном венце.

В данном выражении перемена знака неравенства происходит только в том случае, когда осуществляется переход точки пересечения мгновенной оси вращения с образующей шарошки, контактирующей с забоем.

Однако данная методика основана на использовании усредненных геометрических параметров вооружения и кинематических характеристик шарошек ШБИ.

Необходимость точно определять положение мгновенной оси вращения шарошки для каждого из ее основных осевых сечений, при проектировании ШБИ, связана с возможностью управлять величинами проскальзывания зубьев каждого из венцов шарошки за счет корректирования геометрии ее вооружения.

С целью увеличения точности расчетов, была разработана новая методика определения положения мгновенной оси вращения, в основу которой также заложен принцип наименьшей затраты мощности (рисунок 2.16). Суть методики заключается в следующем [107].

Работа, совершаемая  $i$ -ым зубом вооружения шарошки за единицу времени  $\Delta t$ , определяется как

$$A_i = N_i \Delta t. \quad (2.34)$$

где  $N_i$  - мощность, развиваемая  $i$ -ым зубом, которая в свою очередь равна:

$$N_i = F_i V_i. \quad (2.35)$$

где

$V_i$  - линейная скорость  $i$ -го зуба, м/с;  $F_i$  - сила сопротивления горной породы, Н.

Линейную скорость для каждого  $i$ -го зуба вооружения можно определить по формуле

$$V_i = \omega R_i. \quad (2.36)$$



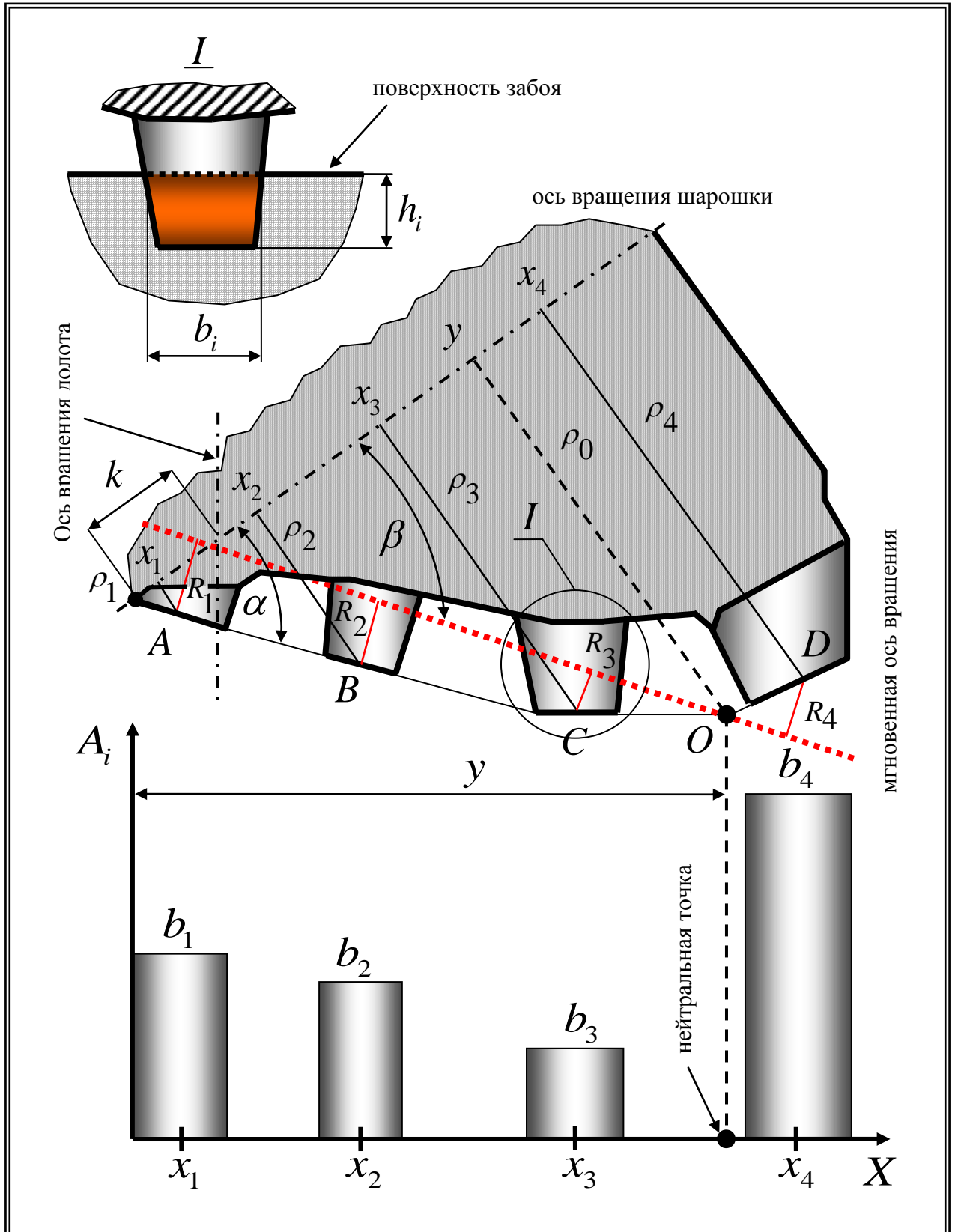


Рисунок 2.16 - Расчетная схема для определения положения мгновенной оси вращения шарошки.

где  $\omega$  - частота вращения вокруг мгновенной оси, с<sup>-1</sup>;  $R_i$  - расстояние от верхней части зуба вооружения до мгновенной оси, мм.

Сила сопротивления горной породы, возникающая в результате проскальзывания зубчатого вооружения ШБИ, определяется как

$$F_i = \rho S_i. \quad (2.37)$$

где  $S_i$  - площадь основной рабочей поверхности  $i$ -го зуба, мм<sup>2</sup>;  $\rho$  - сопротивление породы, Н/м<sup>2</sup>.

Площадь основной рабочей поверхности  $i$ -го зуба определяется как

$$S_i = h_i b_i. \quad (2.38)$$

где  $h_i$  - величина внедрения  $i$ -го зуба в породу, мм.;  $b_i$  - ширина  $i$ -го зуба, мм.

В результате мощность, развиваемая  $i$ -ым зубом, будет определяться как

$$N_i = \rho \omega h_i b_i R_i. \quad (2.39)$$

Выразим  $R_i$  через  $x_i$ , где величина  $x_i$  отсчитывается от вершины шарошки.

Точка А.

$$\sin \beta = \frac{R_1 - \frac{x_1 \operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta}}{(k - x_1) - x_1 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta}; \quad (2.40)$$

$$R_1 - \frac{x_1 \operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta} = (k - x_1) \sin \beta - x_1 \operatorname{tg} \alpha \frac{\sin^2 \beta}{\cos \beta}; \quad (2.41)$$

$$R_1 = (k - x_1) \sin \beta - x_1 \operatorname{tg} \alpha \left( \frac{\sin^2 \beta}{\cos \beta} - \frac{1}{\cos \beta} \right); \quad (2.42)$$

$$R_1 = [x_1 \operatorname{tg} \alpha - (x_1 - k) \operatorname{tg} \beta] \cos \beta; \quad (2.43)$$

$$x_1 \operatorname{tg} \alpha = \frac{R_1}{\cos \beta} + (x_1 - k) \operatorname{tg} \beta; \quad (2.44)$$

$$R_1 = [x_1 \operatorname{tg} \alpha - (x_1 - k) \operatorname{tg} \beta] \cos \beta. \quad (2.45)$$

Точка В.

$$x_2 \operatorname{tg} \alpha = \frac{R_2}{\cos \beta} + (x_2 - k) \operatorname{tg} \beta; \quad (2.46)$$

$$R_2 = [x_2 \operatorname{tg} \alpha - (x_2 - k) \operatorname{tg} \beta] \cos \beta. \quad (2.47)$$

где  $\alpha$  - половина угла образующего конуса вершинной части шарошки, град.

Точка С.

$$\rho_3 = \frac{R_3}{\cos \beta} + (x_3 - k) \operatorname{tg} \beta; \quad (2.48)$$

$$R_3 = [\rho_3 - (x_3 - k) \operatorname{tg} \beta] \cos \beta. \quad (2.49)$$

Точка D.

$$\sin \beta = \frac{R_4 + \rho_4 \cos \beta}{x_4 - k}; \quad (2.50)$$

$$R_4 = (x_4 - k) \sin \beta - \rho_4 \cos \beta; \quad (2.51)$$

$$R_4 = [(x_4 - k) \operatorname{tg} \beta - \rho_4] \cos \beta. \quad (2.52)$$

Таким образом, в зависимости  $R_i$  от  $x_i$ , где  $x_i$  есть последовательность:

- в случае, когда зуб расположен слева от нейтральной точки:

$$R_i = [\rho_i - (x_i - k) \operatorname{tg} \beta] \cos \beta. \quad (2.53)$$

где  $\rho_i = x_i \operatorname{tg} \alpha$ ;

- в случае, когда зуб расположен справа от нейтральной точки:

$$R_i = [(x_i - k) \operatorname{tg} \beta - \rho_i] \cos \beta. \quad (2.54)$$

Далее вычислим работы, совершаемые зубьями вооружения шарошек ШБИ в процессе работы инструмента. Из (рисунок 2.16) видно, что чем дальше расположены зубья вооружения от мгновенной оси вращения и нейтральной точки, тем большие работы они совершают.

В соответствии с принципом наименьшей затраты мощности, данная система должна стремиться минимизировать потенциальную энергию

$$\sum A_i^L = \sum A_i^R. \quad (2.55)$$

Поэтому площади работ  $A_i$ , представленных на (рисунок 2.16) виде прямоугольников, слева и справа от нейтральной точки должны быть одинаковыми:

$$A_1 + A_2 + A_3 + \frac{A_4}{b_4} \left[ \frac{b_4}{2} - (x_4 - y) \right] = \frac{A_4}{b_4} \left[ \frac{b_4}{2} + (x_4 - y) \right]. \quad (2.56)$$

Подставим в это выражение  $A_i$ , тогда

$$N_1 + N_2 + N_3 + \frac{N_4}{b_4} \left[ \frac{b_4}{2} - (x_4 - y) \right] = \frac{N_4}{b_4} \left[ \frac{b_4}{2} + (x_4 - y) \right]; \quad (2.57)$$

$$N_1 + N_2 + N_3 = \frac{2N_4}{b_4} (x_4 - y); \quad (2.58)$$

$$x_4 - y = \frac{(N_1 + N_2 + N_3) b_4}{N_4} \frac{1}{2}; \quad (2.59)$$

$$y = x_4 - \frac{(N_1 + N_2 + N_3) b_4}{N_4} \frac{1}{2}. \quad (2.60)$$

Подставим  $N_i$  и сократим

$$y = x_4 - \frac{\sum_{i=1}^3 h_i b_i (\rho_i - (x_i - k) \operatorname{tg} \beta)}{h_4 b_4 [(x_4 - k) \operatorname{tg} \beta - \rho_4]} \frac{b_4}{2}; \quad (2.61)$$

с другой стороны

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\rho_0}{y - k}; \quad (2.62)$$

значит

$$y = k + \frac{\rho_0}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{k \operatorname{tg} \beta + \rho_0}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (2.63)$$

Следовательно

$$\frac{k \operatorname{tg} \beta + \rho_0}{\operatorname{tg} \beta} = x_4 - \frac{\sum_{i=1}^3 h_i b_i (\rho_i - (x_i - k) \operatorname{tg} \beta)}{h_4 b_4 [(x_4 - k) \operatorname{tg} \beta - \rho_4]} \frac{b_4}{2}; \quad (2.64)$$

Тогда  $\operatorname{tg} \beta$  можно определить из следующего равенства:

$$\frac{k \operatorname{tg} \beta + \rho_0}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{x_4 h_4 b_4 [(x_4 - k) \operatorname{tg} \beta - \rho_4] - \frac{b_4}{2} \sum_{i=1}^3 h_i b_i (\rho_i - (x_i - k) \operatorname{tg} \beta)}{h_4 b_4 [(x_4 - k) \operatorname{tg} \beta - \rho_4]}; \quad (2.65)$$

$$\begin{aligned} (k \operatorname{tg} \beta + \rho_0) h_4 b_4 [(x_4 - k) \operatorname{tg} \beta - \rho_4] &= \\ &= x_4 h_4 b_4 [(x_4 - k) \operatorname{tg} \beta - \rho_4] \operatorname{tg} \beta - \frac{b_4}{2} \operatorname{tg} \beta \sum_{i=1}^3 h_i b_i (\rho_i - (x_i - k) \operatorname{tg} \beta). \end{aligned} \quad (2.66)$$

Далее решается квадратное уравнение

$$A \operatorname{tg}^2 \beta + B \operatorname{tg} \beta + C = 0; \quad (2.67)$$

$$\begin{cases} A = -h_4 b_4 (x_4 - k)^2 - \frac{b_4}{2} \sum_{i=1}^3 h_i b_i (x_i - k) \\ B = \rho_0 h_4 b_4 (x_4 - k) - \rho_4 k h_4 b_4 + \rho_4 x_4 h_4 b_4 + \frac{b_4}{2} \sum_{i=1}^3 h_i b_i \rho_i \\ C = -\rho_0 \rho_4 h_4 b_4 \end{cases} \quad (2.68)$$

И определяется угол наклона мгновенной оси вращения шарошки к оси вращения ШБИ [107]

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sqrt{B^2 - 4AC} - B}{2A}. \quad (2.69)$$

Таким образом, новая методика определения положения мгновенной оси вращения шарошки ШБИ (в основе которой лежит принцип наименьшей затраты мощности), позволяет с большей точностью выявлять расположение ведущего венца за счет вычисления координат нейтральных точек для каждого из основных осевых сечений шарошки, а также рассчитывать величины проскальзывания ведомых венцов вооружения ШБИ.

## 2.6 Определение геометрических параметров вооружения, обеспечивающих повышение эффективности работы инструмента в процессе бурения мягких пород

Как уже отмечалось, ШБИ ударно-режущего действия, предназначенный для бурения скважин в мягких и средних породах, характеризуется наличием проскальзывания зубьев отдельных венцов шарошек в процессе работы инструмента. При этом один из средних или периферийных венцов становится ведущим, т. е. задает частоту вращения шарошки, а все остальные венцы - ведомыми. Как правило, ведомые вершинные венцы работают в режиме пробуксовки, а периферийные в режиме подтормаживания [107, 151, 167].

Исследование процесса проскальзывания зубчатого вооружения ШБИ при «перекатывании» его шарошек по поверхности забоя дает возможность определить основные направления по дальнейшему совершенствованию геометрии вооружения ШБИ с целью повышения эффективности его работы.

Рассмотрим подробнее процесс «перекатывания» шарошки ШБИ в условиях «мягкого» забоя (рисунок 2.17), т. е. когда зубья его вооружения углубляются в породу на некоторую величину и одновременно проскальзывают. При этом проскальзывание зубчатого вооружения по направлению вращения ШБИ называется подтормаживание, а против – пробуксовка [120].

Для начала определим координаты точки  $C$  :

$$\begin{cases} x_c = x_o + x_{co} ; \\ y_c = y_o + y_{co} \end{cases} \quad (2.70)$$

$$\begin{cases} x_c = v_0 t + R \cos \alpha = v_0 t + R \cos(\omega t) \\ y_c = R - R \sin \alpha = R - R \sin(\omega t) \end{cases} \quad (2.71)$$

Затем рассчитаем координаты крайних точек траектории скольжения при  $V_x = 0$ , т. е. условия их возникновения:

$$V_x = \frac{dx_c}{dt} = v_0 - R\omega \sin(\omega t); \quad (2.72)$$

$$V_x = R\omega \left[ \frac{v_0}{R\omega} - \sin(\omega t) \right]. \quad (2.73)$$

Введем предположение, что  $\frac{v_0}{R\omega} = k$ ,

где  $k$  - коэффициент движения колеса, в таком случае если:

$k < 1$ , будет происходить подтормаживание;

$k = 1$ , происходит чистое качение;

$k > 1$ , будет происходить пробуксовка.

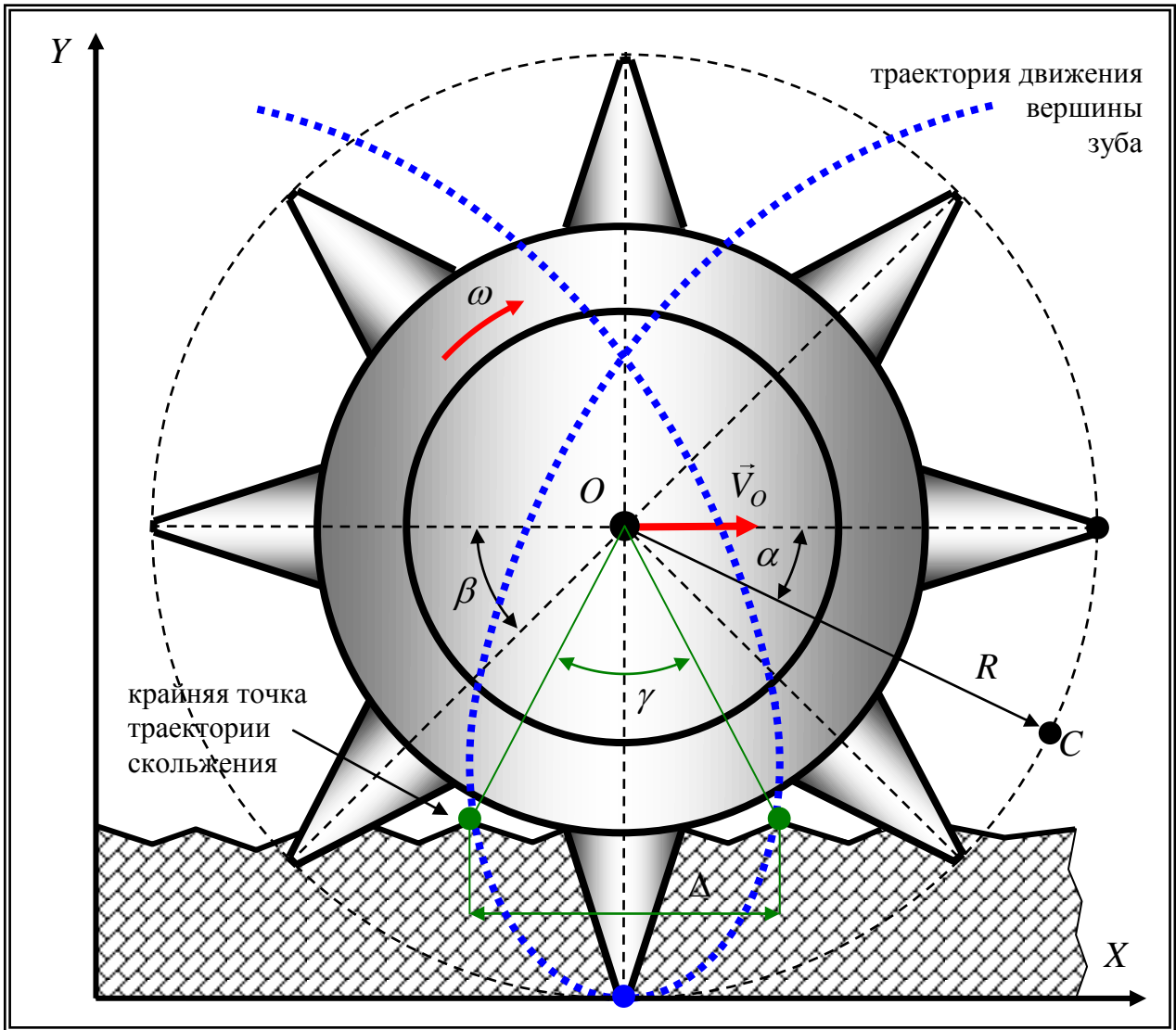


Рисунок 2.17 - Принципиальная схема движения шарошки в режиме пробуксовки

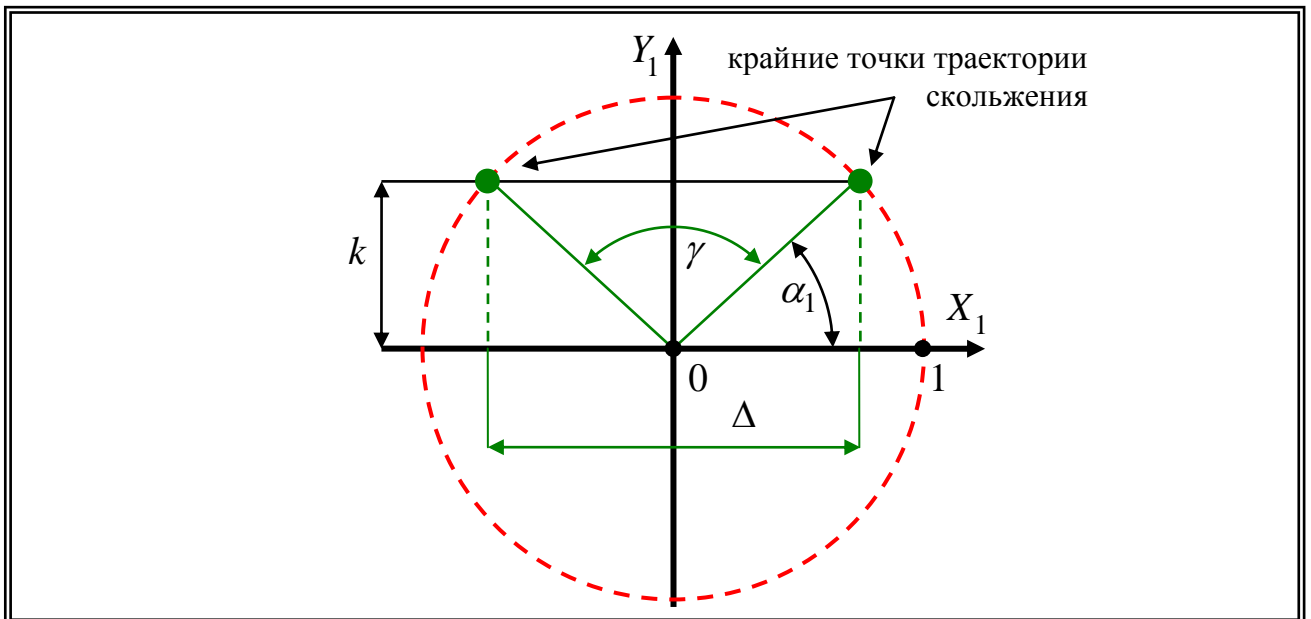


Рисунок 2.18 - Расчетная схема

$$\begin{cases} k - \sin(\omega t) = 0 \\ k \in (0;1) \end{cases}. \quad (2.74)$$

Создадим единичную окружность как показано на (рисунок 2.18). Далее проведем прямую с координатой  $y = k$ , тогда места пересечения этой прямой и окружности будут крайними точками траектории скольжения вершины зуба вооружения шарошки.

В первой точке (крайняя справа точка траектории скольжения) в момент времени  $t_1$  вершина зуба вооружения шарошки будет, когда  $\omega t_1 = \alpha_1$ , а во второй (крайняя слева точка траектории скольжения) в момент времени  $t_2$ , когда  $\omega t_2 = \alpha_1 + \gamma$ .

В процессе движения вершины зуба вооружения по траектории от крайней правой до крайней левой точки шарошка проворачивается на угол  $\gamma$ .

Тогда, исходя из (рисунок 2.18):

$$\alpha_1 + \frac{\gamma}{2} = 90^\circ; \quad (2.75)$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = \arcsin k \\ \gamma = 2 \arccos k \end{cases}. \quad (2.76)$$

Затем определим максимальную ширину траектории скольжения  $\Delta$ :

$$\Delta = x_{C1} - x_{C2}. \quad (2.77)$$

где

$$\begin{cases} x_{C1} = v_0 t_1 + R \cos \alpha_1 \\ x_{C2} = v_0 t_2 + R \cos(\alpha_1 + \gamma) \end{cases}; \quad \begin{cases} \omega t_1 = \alpha_1 \\ \omega t_2 = \alpha_1 + \gamma \end{cases}. \quad (2.78)$$

Согласно (рисунок 2.19)  $\cos \alpha_1 = -\cos(\alpha_1 + \gamma)$ , в таком случае

$$\Delta = v_0(t_1 - t_2) + 2R \cos \alpha_1 = v_0 \left( \frac{\alpha_1}{\omega} - \frac{\alpha_1 + \gamma}{\omega} \right) + 2R \cos \alpha_1 = 2R \cos \left[ \arcsin \frac{v_0}{R\omega} \right] - \frac{v_0 \gamma}{\omega}. \quad (2.79)$$

В результате преобразований получаем

$$\Delta = 2R \sqrt{1 - \left( \frac{v_0}{R\omega} \right)^2} - \frac{v_0 \gamma}{\omega}. \quad (2.80)$$

где

$$\gamma = 2 \arccos \frac{v_0}{R\omega}. \quad (2.81)$$

Таким образом, по данной методике можно рассчитать значение угла проворота шарошки и величину скольжения отдельных зубчатых венцов ШБИ, работающих с пробуксовкой вооружения. Аналогичным образом эти величины могут быть определены и в случае подтормаживания зубчатого вооружения ШБИ.

Рассмотрим более подробно процесс образования лунок в поверхности забоя в результате воздействия на него зубьев вооружения ШБИ.

Предположим, что при «перекатывании» шарошки по деформируемому забою зубья ее вооружения внедряются в него на максимальную величину  $h$  только в вертикальном положении, при этом два смежных с ним зуба опираются своими вершинами на поверхность забоя (рисунок 2.19). В этом случае величина максимального внедрения определяется как [127]

$$h = R(1 - \cos \beta), \quad (2.82)$$

где  $\beta$  - угол, образованный между средними линиями двух соседних зубьев;

$R$  - радиус венца, мм.

При перекатывании вооружения шарошки в режиме чистого качения (рисунок 2.19.1) полное формирование лунки происходит при повороте шарошки на угол  $2\beta$ . При этом центр сечения шарошки проходит расстояние  $O - O_1$ , равное

$$L_K = \frac{2\pi R\beta}{180}. \quad (2.83)$$

В данном режиме размер лунки в большей степени определяется геометрией самого зуба, а расстояние между соседними лунками - шагом зубьев.

При перекатывании вооружения шарошки в режиме пробуксовки (рисунок 2.19.2) и (рисунок 2.19.3) полное формирование лунки также осуществляется при повороте шарошки на угол  $2\beta$ , однако одновременно с этим происходит и дополнительный проворот на угол скольжения  $\gamma$ . В связи с этим центр сечения шарошки проходит расстояние  $O - O_2$

$$L_{c1} = \frac{\pi R(2\beta - \gamma)}{180}. \quad (2.84)$$

В этом случае размер лунки определяется не только геометрическими размерами зуба, но и величиной пробуксовки, которая определяется как

$$\Delta = L_K - L_{c1} = \frac{\pi R\gamma}{180}. \quad (2.85)$$

а расстояние между лунками равно шагу зубьев за вычетом  $\Delta/2$ . При этом происходит увеличение площади поражения забоя зубчатым вооружением шарошки в вертикальной плоскости, а расстояние между краями соседних лунок уменьшается.

При дальнейшем увеличении величины пробуксовки вооружения (рисунок 2.19.3) размер лунки в большей степени определяется именно величиной пробуксовки, а не геометрическими размерами зубьев вооружения. При этом ширина лунок увеличивается, а шаг уменьшается, что приводит к наложению соседних лунок друг на друга.



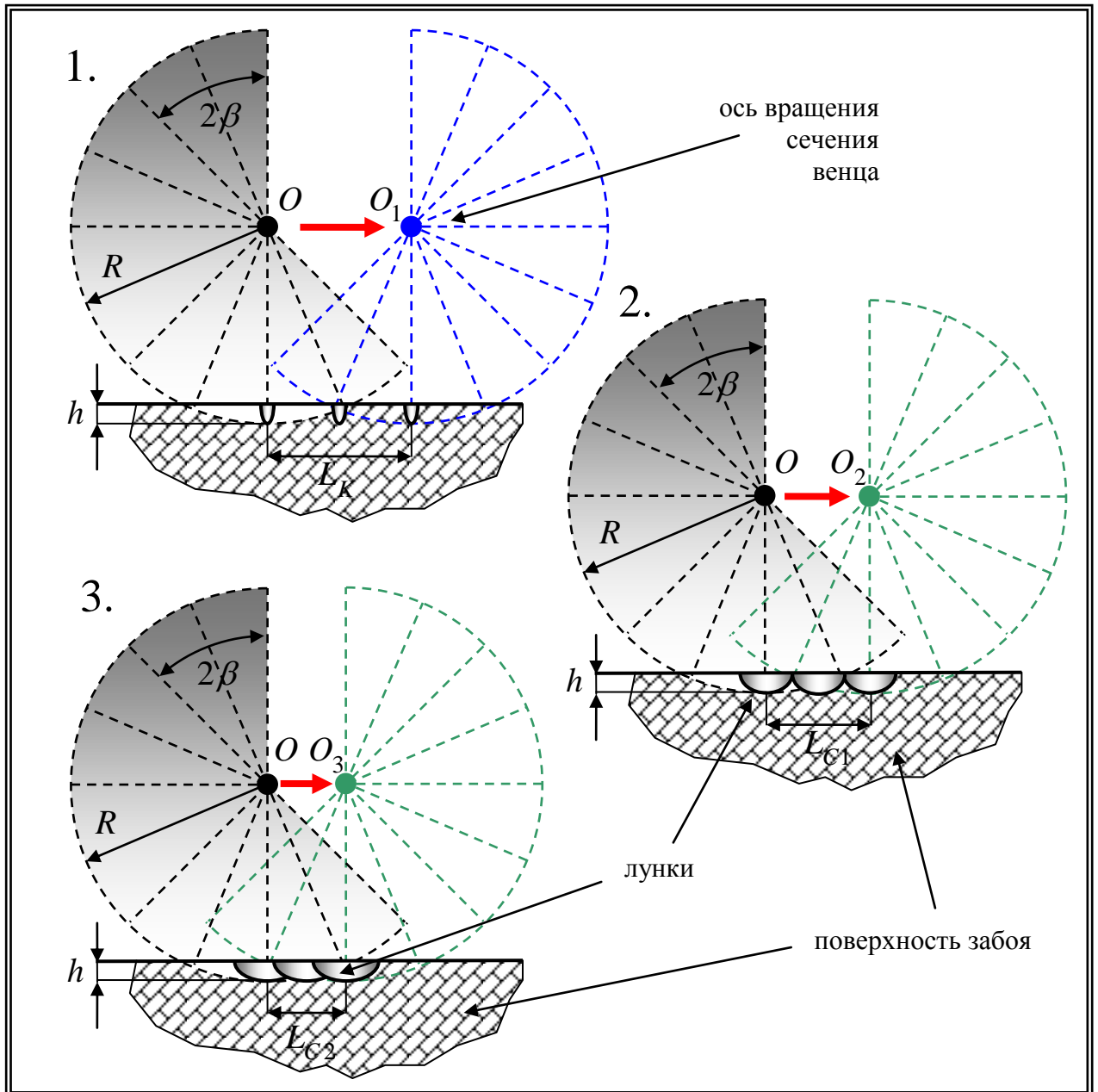


Рисунок 2.19 - Принципиальная схема лункообразования в поверхности заоя при перекатывании шарошки

1 - при чистом качении; 2 и 3 - при пробуксовке вооружения

Для того чтобы повысить эффективность работы ШБИ при бурении мягких, не склонных к образованию забойной рейки горных пород, нужно разработать такую геометрию зубчатого вооружения шарошек, при работе которой каждый следующий зуб вооружения, вступающий в контакт с забоем, разрушал бы максимально возможный объем породы. Как было установлено ранее, в отличие от ШБИ, работающего без проскальзывания зубчатого вооружения, то есть когда лунка, формируемая каждым зубом на забое, не накладывается на предыдущую и последующую и имеет немного развальцованную по краям форму самого зуба, у ШБИ, работающего с проскальзыванием зубчатого вооружения, лунка представляет собой углубление параболической формы, геометрия которой зависит от направления и величины проскальзывания каждого конкретного зуба. В дополнение к этому лунки, образующиеся в поверхности забоя в процессе работы ШБИ, могут не только раздвигаться по отношению к величине шага зубьев вооружения проскальзывающего венца, но и сдвигаться, при этом накладываются друг на друга. Поэтому важно исследовать этот процесс и определить такие величины проскальзывания зубчатого вооружения шарошек, которые бы обеспечивали максимально возможный объем поражения забоя при бурении ШБИ. На (рисунок 2.20) представлена схема лункообразования на поверхности забоя при пробуксовке зубьев вооружения шарошки в процессе работы ШБИ. В этом случае, для достижения максимального поражения забоя в вертикальной плоскости расположение зубьев и величина проскальзывания вооружения должны обеспечивать выполнение следующего условия: место выхода из взаимодействия с породой на поверхность забоя каждого следующего зуба шарошки должно по возможности совпадать с местом входа в нее предыдущего зуба ШБИ. Схема, демонстрирующая выполнение этого условия представлена на (рисунок 2.20). Для того чтобы обеспечить выполнение данного условия, необходимо, чтобы величина проскальзывания  $\Delta_\beta$  вооружения на каждый угол  $\beta$  поворота шарошки была равна

$$\Delta_\beta = R \left( \frac{\pi\beta}{180} - \frac{2}{3} \sin \beta \right), \quad (2.86)$$

где  $\beta$  - угол образованный средними линиями двух соседних зубьев;  $R$  - радиус венца, мм.

На (рисунок 2.21) представлена схема лункообразования на поверхности забоя при подтормаживании зубьев вооружения шарошки в процессе работы ШБИ. В этом случае, для достижения максимального поражения забоя в вертикальной плоскости расположение зубьев и величина проскальзывания вооружения должны обеспечивать выполнение следующего условия: место входа во взаимодействие с породой забоя каждого следующего зуба шарошки должно по возможности совпадать с местом выхода из нее предыдущего зуба ШБИ. Схема, демонстрирующая выполнение этого условия, представлена на (рисунок 2.21). Для того чтобы обеспечить выполнение данного условия, необходимо, чтобы величина

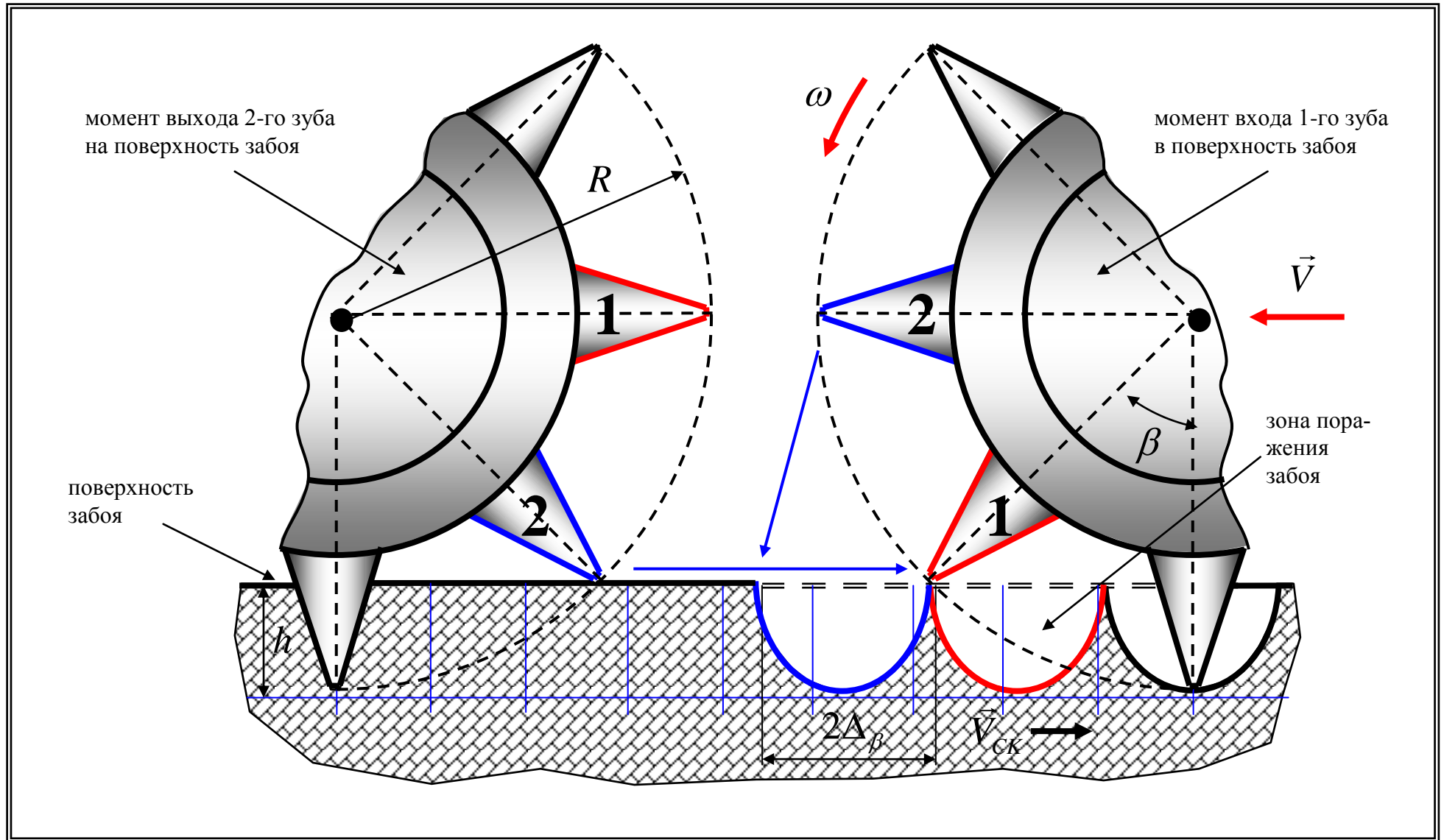


Рисунок 2.20 - Схема лункообразования на поверхности забоя при пробуксовке зубьев вооружения

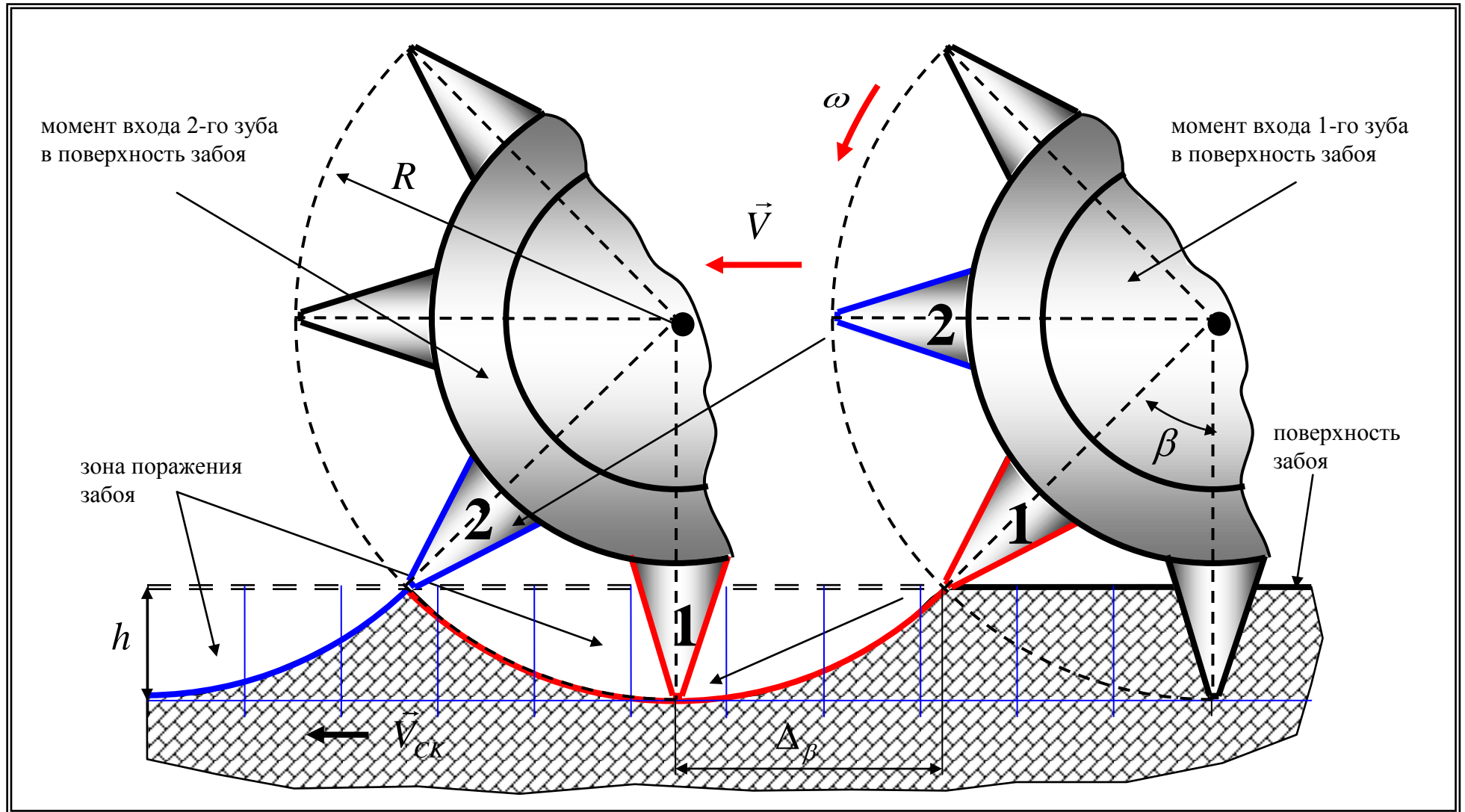


Рисунок 2.21 - Схема лункообразования на поверхности заоя при подтормаживании зубьев вооружения

проскальзывания  $\Delta_\beta$  вооружения на каждый угол  $\beta$  поворота шарошки была равна

$$\Delta_\beta = R \left( 2 \sin \beta - \frac{\pi \beta}{180} \right). \quad (2.87)$$

Как видно из (рисунок 2.20) и (рисунок 2.21), при работе ШБИ с представленными геометриями зубчатого вооружения за один полный оборот инструмента на забое образуется рейка, высота выступов которой равна максимальному в данных условиях бурения заглублению зубьев. При этом перемычки между соседними лунками представляют собой тонкие линейные поверхности.

Проведенные исследования процессов пробуксовки и подтормаживания зубчатого вооружения ШБИ позволили установить влияние величин и направлений проскальзывания на расположение и геометрию лунок, создаваемых зубьями вооружения ШБИ на забое.

На (рисунок 2.22) представлены принципиальные схемы лункообразования на поверхности забоя для различных величин пробуксовки зубьев вооружения ШБИ.

К примеру, определим, как влияет изменение величин пробуксовки на общую площадь поражения забоя по вертикали двумя смежными зубьями вооружения ШБИ. При увеличении скорости и соответственно величины проскальзывания происходит выполаживание параболической формы лунок. Это, в свою очередь, приводит к частичному наложению зон обработки забоя предыдущим и последующим зубьями вооружения (рисунок 2.22). В свою очередь, при уменьшении величины проскальзывания, происходит сжатие параболической формы лунок и соответственно уменьшение их ширины, что приводит к образованию необработанной части поверхности забоя между соседними лунками и уменьшению общей площади поражения забоя по вертикали.

Таким образом, общая площадь поражения забоя по вертикали в результате последовательной обработки ее двумя смежными зубьями вооружения ШБИ уменьшается как с увеличением, так и с уменьшением величины проскальзывания относительно определенного ра-

нее ее оптимального значения  $\Delta_\beta = R \left( \frac{\pi \beta}{180} - \frac{2}{3} \sin \beta \right)$ .

Определить площади поражения забоя по вертикали можно с помощью известной формулы Архимеда, позволяющей вычислять площадь параболического сегмента

$$S = \frac{2}{3} hL; \quad (2.88)$$

где  $L$  - ширина сегмента, мм;  $h$  - величина максимального внедрения зуба, мм.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что для достижения максимального поражения забоя в вертикальной плоскости величина проскальзывания зубьев

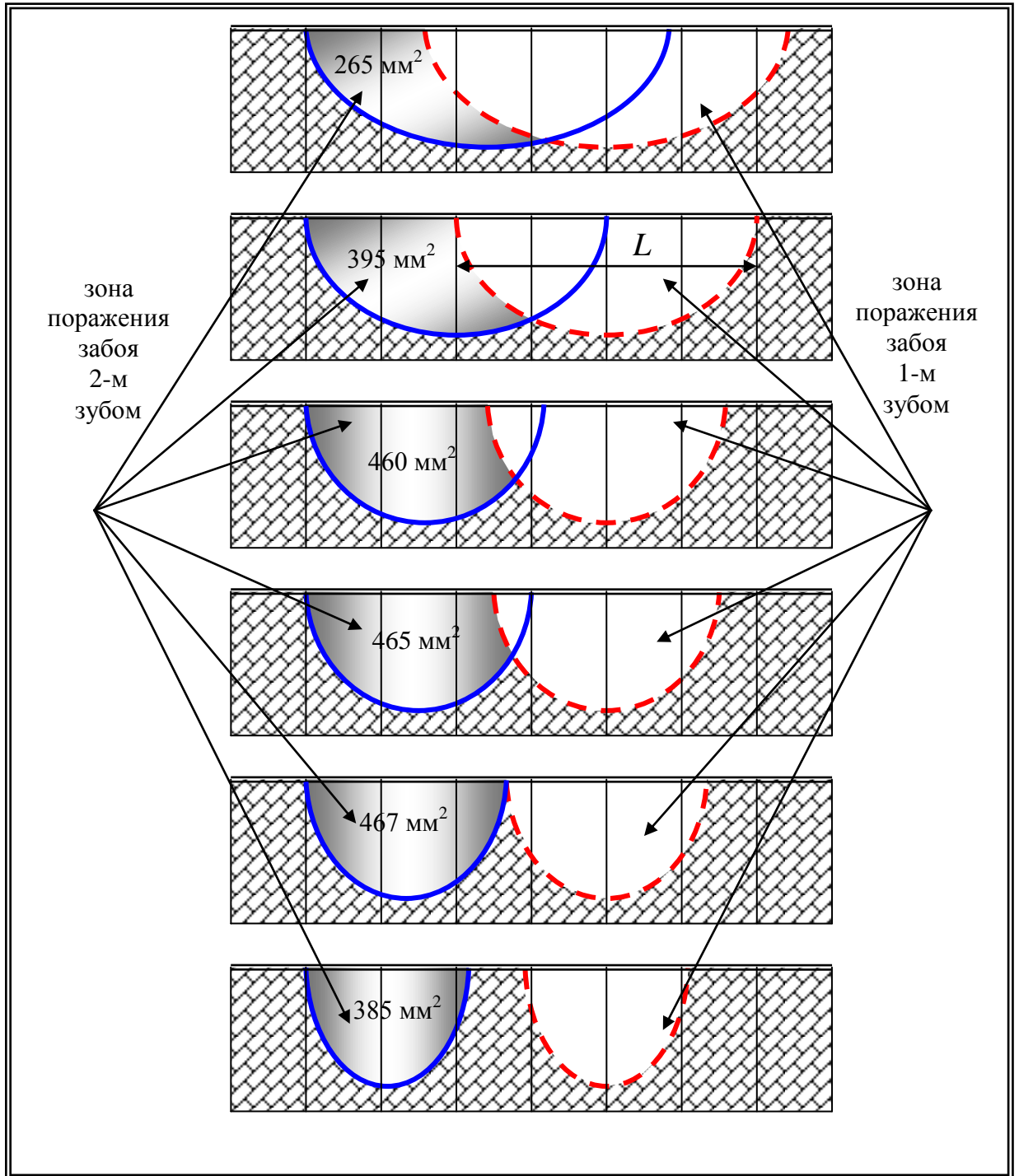


Рисунок 2.22 - Схемы поражения заобья при различных величинах проскальзывания зубьев вооружения.

вооружения -  $\Delta_\beta$  должна соответствовать определенному значению, рассчитываемому индивидуально для каждого варианта геометрии и направления проскальзывания вооружения. Отклонение от значения данной величины в меньшую или большую сторону приводит к снижению общей площади поражения забоя по экспоненциальному закону. При этом с увеличением величин проскальзывания зубчатого вооружения ШБИ существенно улучшается качество выравнивания забоя, в то время как с их уменьшением повышается вероятность образования забойной рейки.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что для того чтобы повысить эффективность работы ШБИ при бурении мягких, не склонных к образованию забойной рейки горных пород за счет обеспечения максимального объема разрушаемой породы каждым зубом ведомых венцов его вооружения, необходимо, чтобы величины проскальзывания зубьев шарошек находилась в пределах [77]:

$$\Delta_\beta = (0,9 \div 1,1)R \left( 2 \sin \beta - \frac{\pi\beta}{180} \right) \text{ при подтормаживании;}$$

$$\Delta_\beta = (0,9 \div 1,1)R \left( \frac{\pi\beta}{180} - \frac{2}{3} \sin \beta \right) \text{ при пробуксовке}$$

Проектирование и изготовление новых конструкций зубчатого вооружения шарошек с учетом этих параметров позволит повысить эффективность работы ШБИ за счет увеличения механической скорости бурения и проходки на инструмент и снижения стоимости бурения.

## **2.7 Определение геометрических параметров вооружения, обеспечивающих повышение эффективности работы инструмента в процессе бурения средних пород**

Для того чтобы повысить эффективность работы ШБИ при бурении средних, склонных к образованию забойной рейки горных пород, нужно не только максимизировать разрушающую составляющую работы вооружения, но и обеспечить качественное выравнивание поверхности забоя, чтобы исключить возможность появления рейкообразования и обеспечить постоянно высокую механическую скорость бурения на всем протяжении работы инструмента.

Как известно, бурение пород средней твердости часто сопровождается образованием забойной рейки, отрицательно влияющей на эффективность разрушения породы. Размеры рейки зависят как от геометрических размеров и расположения зубьев, так и от величины пробуксовки вооружения. При вторичной обработке речного забоя вооружением ШБИ может возникнуть вероятность попадания зубьев вооружения «след в след», т. е. когда верши-

ны зубьев вооружения окажутся во впадинах рейки забоя. В результате этого последующее углубление инструмента в породу будет ограничиваться не только геометрией вооружения (как в случае первоначального плоского забоя), но и в значительной степени ответной геометрией рейки забоя, образованной в результате предыдущего полного поворота инструмента [127].

На (рисунок 2.23) представлена схема влияния величины проскальзывания зубьев вооружения ШБИ на выравнивание поверхности забоя. Из рисунка видно, что чем больше величина проскальзывания зубьев вооружения, тем более качественное выравнивание поверхности забоя. Однако есть такой диапазон величины проскальзывания, за пределами которого эффективность работы вооружения снижается. Так, например, при величине пробуксовки вооружения, обеспечивающей выравнивание рейки на величину  $D_1$  (рисунок 2.23) снижается глубина внедрения зубьев вооружения при следующем обороте инструмента. В свою очередь при величине пробуксовки вооружения, обеспечивающей выравнивание рейки на величину  $D_3$ , не происходит дальнейшего увеличения глубины внедрения зубьев вооружения при следующем обороте инструмента.

На (рисунок 2.24) представлена схема образования поверхности забоя при разных величинах пробуксовки зубьев вооружения ШБИ.

При величине пробуксовки вооружения

$$\Delta_{\beta} \ll (0,95 \div 1,05) R \left( \frac{\pi\beta}{180} - \frac{1}{2} \sin \beta \right). \quad (2.89)$$

углубление при втором и последующих полных поворотах долота будет более чем на половину меньше, чем при первом обороте (рисунок 2.24.1).

С увеличением величины пробуксовки вооружения:

$$\Delta_{\beta} < (0,95 \div 1,05) R \left( \frac{\pi\beta}{180} - \frac{1}{2} \sin \beta \right). \quad (2.90)$$

происходит выравнивание поверхности забоя и, как следствие этого, увеличение величины внедрения зубьев вооружения шарошки при втором и последующих полных оборотах инструмента (рисунок 2.24.2).

И, наконец, при достижении величины проскальзывания вооружения шарошки бурового инструмента

$$\Delta_{\beta} = (0,95 \div 1,05) R \left( \frac{\pi\beta}{180} - \frac{1}{2} \sin \beta \right). \quad (2.91)$$

все три вершины смежных зубьев вооружения попадают во впадины рейки забоя, образованной предыдущим проходом инструмента (рисунок 2.24.3), создаются условия,



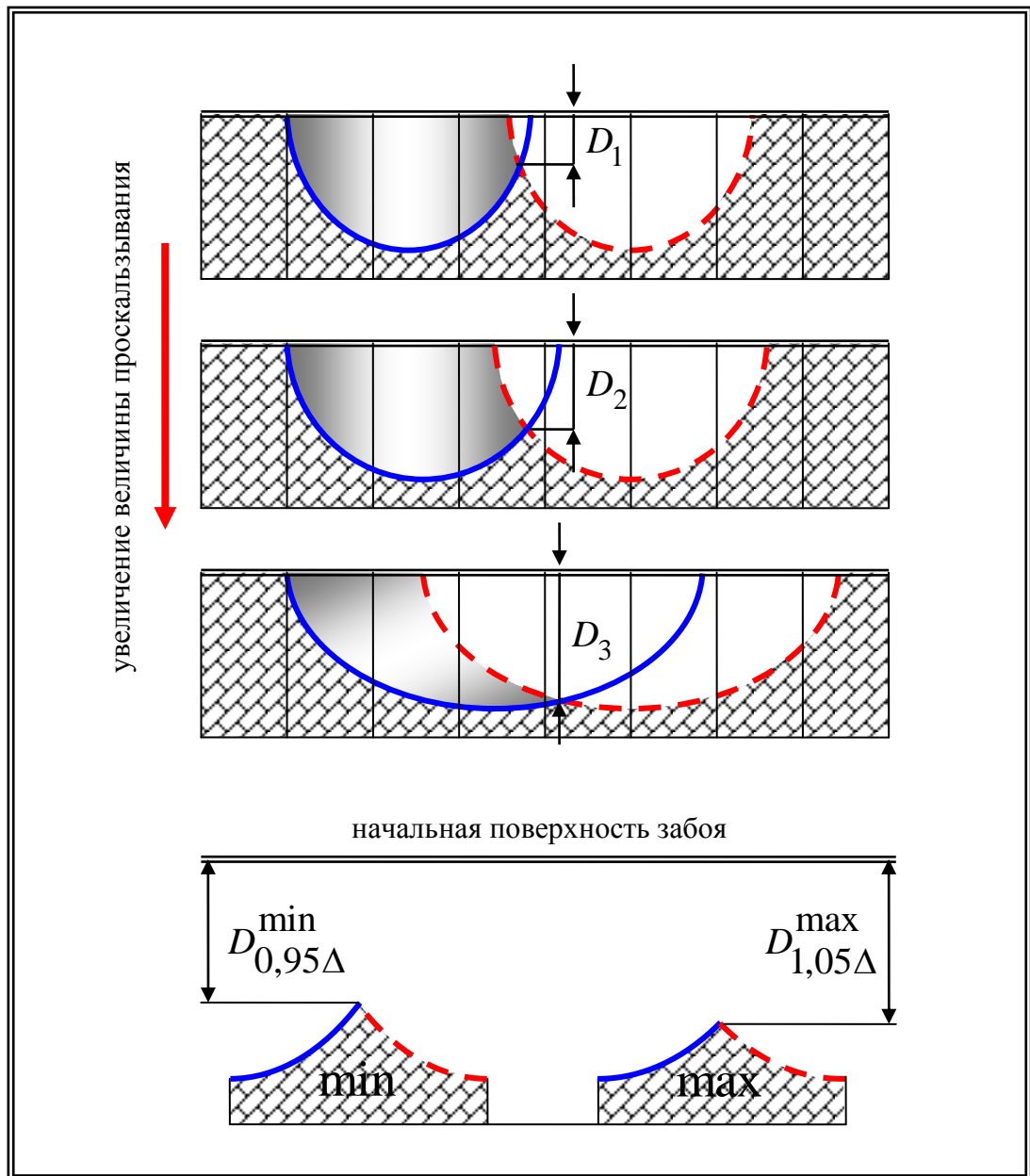


Рисунок 2.23 - Схема влияния величины проскальзывания зубьев вооружения на выравнивание поверхности забоя скважины.

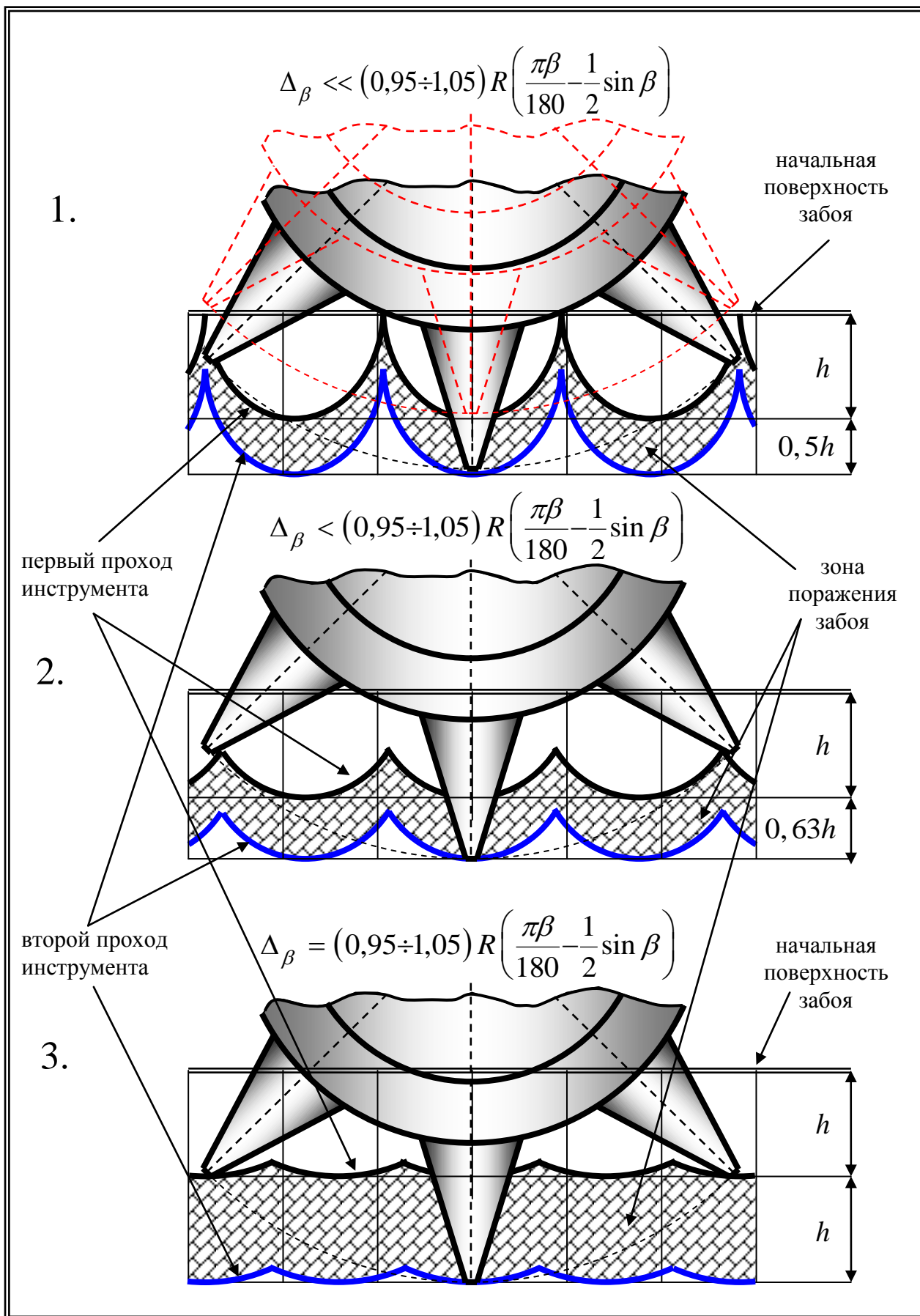


Рисунок 2.24 - Схема образования поверхности заоя при разных величинах пробуксовки зубьев вооружения ШБИ

обеспечивающие 100 % - по отношению к первому проходу инструмента углубление вооружения в поверхность забоя при втором и последующих полных оборотах ШБИ [75].

Таким образом, чтобы повысить эффективность работы вооружения ШБИ за счет увеличения объема разрушенной породы за весь цикл работы инструмента, работающего в режиме пробуксовки вооружения, с одновременным качественным выравниванием поверхности забоя, необходимо, чтобы величина проскальзывания зубьев шарошек находилась в пределах

$$\Delta_{\beta} = (0,95 \div 1,05) R \left( \frac{\pi\beta}{180} - \frac{1}{2} \sin \beta \right). \quad (2.92)$$

Создание бурового инструмента с вооружением, соответствующим этому критерию, позволит обеспечить более эффективное разрушение средних пород в течение всего времени работы инструмента и, как следствие, повысить механическую скорость проходки и снизить стоимость проведения буровых работ.

## **2.8. Исследование кинематики шарошечного долота в процессе его работы в составе агрегата реактивно-турбинного бурения**

Бурение стволов и скважин больших диаметров способом РТБ осуществляется при помощи специальных забойных агрегатов, состоящих из нескольких жестко соединенных траверсами в один ряд и одновременно работающих турбобуров, оснащенных ШД (рисунок 2.25). Вращение агрегата РТБ в большинстве случаев происходит самостоятельно, за счет сил реакции забоя, возникающих вследствие работы ШД, и не требует дополнительного использования ротора буровой установки. В результате шарошечные долота с небольшими по отношению к размеру ствола диаметрами целиком обрабатывают всю поверхность забоя большого диаметра [10, 89, 169].

Как правило, агрегаты РТБ состоят из двух, трех или четырех параллельно расположенных и жестко соединенных между собой поперечными траверсами турбобуров. Верхняя траверса присоединяется к колонне бурильных труб, при этом ее нижняя сторона соединяется с корпусами турбобуров. Верхняя траверса представляет собой полую конструкцию с каналами, сквозь которые из колонны бурильных труб промывочная жидкость попадает в турбобуры и далее к шарошечным долотам.

Нижняя траверса жестко связывает нижние части корпусов турбобуров и служит местом установки грузов, имеющих цилиндрическую форму с отверстиями, через которые

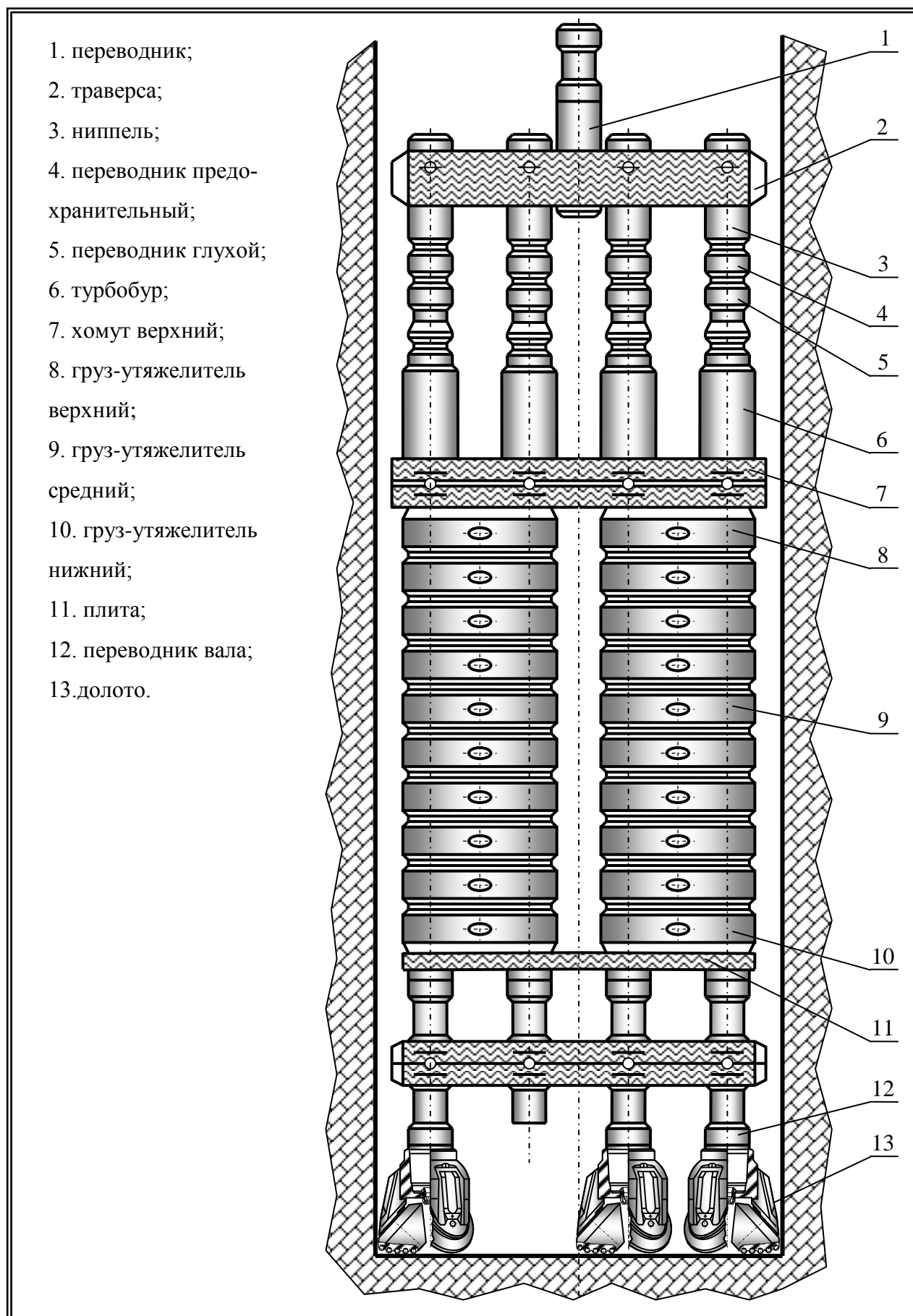


Рисунок 2.25 - Реактивно-турбинный бур РТБ 6М2-2080

проходят корпуса турбобуров. При РТБ на поверхности применяют штатное буровое оборудование, которое используется для сооружения нефтяных и газовых скважин. На колонне бурильных труб к поверхности забоя спускают исполнительный орган агрегата с турбобурами и подсоединенными к ним шарошечными долотами. Промывочную жидкость буровыми насосами через систему шлангов, вертлюг и бурильные трубы подают в турбобуры, преобразующие гидравлическую энергию потока жидкости в механическую, вращающую все долота агрегата по часовой стрелке. Это приводит к возникновению реактивного момента на каждом из корпусов всех турбобуров. Суммарный реактивный момент передается на траверсы и позволяет самостоятельно вращать агрегат против часовой стрелки. Сочетание противоположных вращений - долот «по», а агрегата «против» часовой стрелки - позволяет, используя шарошечные долота незначительных (по отношению к размерам ствола) диаметров, обрабатывать всю площадь большого забоя [95, 142, 147].

В процессе РТБ очистка забоя от шлама, так же как и при обычных способах бурения, осуществляется потоками промывочной жидкости, с последующим выносом его на поверхность восходящими потоками. При этом наиболее крупные обломки разрушенной породы убираются из забоя в перерывах процесса бурения при помощи эрлифта. За счет большой массы грузов, превышающей необходимую осевую нагрузку на буровой инструмент, бурильная колонна всегда растянута и система «буровая колонна – агрегат» работает как обыкновенный отвес. В связи с этим бурение стволов и скважин большого диаметра способом РТБ всегда осуществляется с минимальными отклонениями от вертикали [150].

Основными преимуществами этого способа бурения являются:

- высокая скорость бурения скважин большого диаметра;
- низкий крутящий момент на буровой колонне;
- бурение стволов большого диаметра с минимальным отклонением от вертикали;
- возможность использования стандартного бурового инструмента и оборудования.

Одним из основных рабочих элементов агрегатов РТБ, непосредственно разрушающих породу и образующих ствол скважины, как и при классических способах бурения, является ШБИ [129, 137].

Как правило, в составе агрегатов РТБ используются стандартные ШД, предназначенные для обычных способов бурения. Однако практика проходки стволов большого диаметра агрегатами РТБ свидетельствует о том, что ШД, предназначенные для использования в классическом бурении, не всегда достаточно эффективны при работе в условиях РТБ. Так, при бурении ствола диаметром до 4 метров трех- или четырех-турбинным агрегатом РТБ стойкость стандартных ШД редко превышает 40 часов.

Низкая стойкость стандартных ШД при работе в составе агрегатов РТБ обусловлена более сложными условиями бурения вследствие сильного зашламления забоя, повышенных динамических нагрузок и значительного увеличения проскальзывания вооружения ШД по забою.

Поэтому повышение эффективности ШД, работающих в составе агрегатов РТБ, является одной из приоритетных задач по совершенствованию этого способа бурения. С целью решения этой задачи для начала изучим принцип и условия работы ШД при РТБ.

Как отмечалось ранее, вращение агрегата РТБ осуществляется за счет сил реакции забоя, передающихся агрегату от работающих долот. На (рисунок 2.26) представлена схема взаимодействия внешнего ШД агрегата РТБ с забоем.

В процессе работы ШД в составе РТБ на каждый зуб его вооружения, принимающего участие в разрушении породы, действует сила реакции забоя -  $p$ . Если приложить к оси вращения ШД с диаметральной размером -  $d$ , пару взаимоуравновешивающих сил -  $p$ , то становится очевидным, что сила реакции забоя, передающаяся через один из зубьев вооружения ШД на агрегат РТБ, приведет к паре сил образующих момент -  $pd/2$ , и силе -  $p$ .

Нормальная составляющая этой силы -  $p_n$ , воздействуя на вал турбобура, создает вращающий момент относительно оси вращения агрегата [93, 130], равный

$$p \cdot \frac{D-d}{2} \cos \alpha. \quad (2.93)$$

где  $D$  - диаметр агрегат РТБ, мм.

Если принять за положительное направление против часовой стрелки, то каждый зуб вооружения ШД будет передавать на агрегат реактивный момент величиной

$$M_R = p \cdot \frac{d}{2} - p \cdot \frac{D-d}{2} \cos \alpha. \quad (2.94)$$

который будет стремиться повернуть агрегат вокруг оси его вращения, а тангенциальная проекция реактивной силы, определяемая как

$$p_\tau = -p \sin \alpha. \quad (2.95)$$

будет стремиться уводить агрегат в сторону.

Для установившегося режима работы агрегата средняя величина реакции забоя на зуб ШД будет равна

$$P_{cp} = \frac{M_D}{k \frac{d}{2}}. \quad (2.96)$$

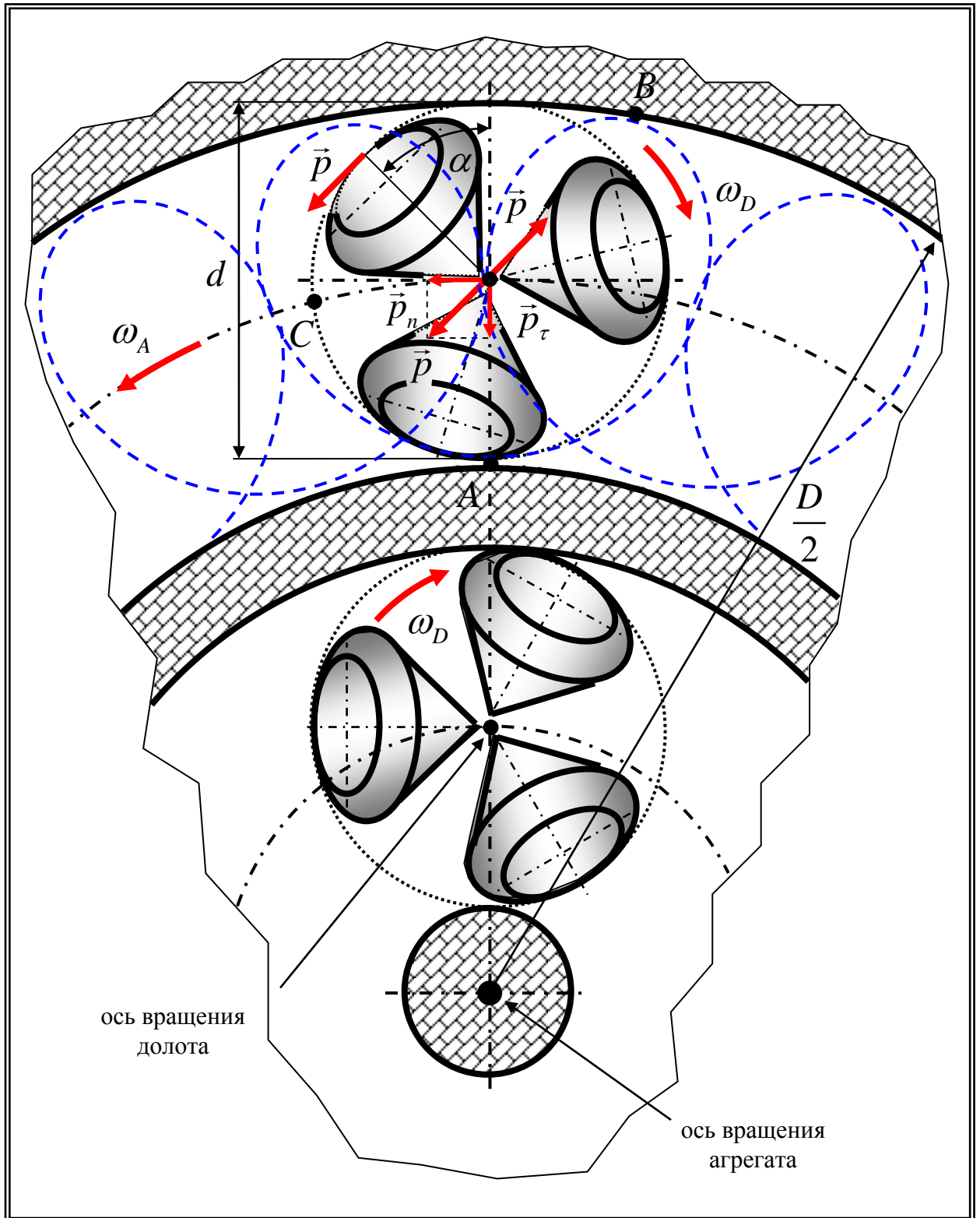


Рисунок 2.26 - Схема взаимодействия одного из внешних долот агрегата РТБ с забоем

где  $M_D$  - вращающий момент на ШД;  $k$  - количество зубьев ШД, одновременно взаимодействующих с поверхностью забоя.

Тогда

$$\sum M_R = M_D - \frac{M_D}{k} \frac{D-d}{2} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2 \dots + \cos \alpha_k); \quad (2.97)$$

$$\sum P = -\frac{2M_D}{kd} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2 \dots + \sin \alpha_k). \quad (2.98)$$

В случае, когда зубья вооружения ШД распределены равномерно по всем венцам шарошек, то тогда:

$$\sum \sin \alpha = 0; \quad \sum \cos \alpha = 0, \quad (2.99)$$

и соответственно:

$$\sum M_R = M_D; \quad \sum P = 0. \quad (2.100)$$

Таким образом, в результате проведенных расчетов было установлено, что при работе ШД, зубья вооружения которого распределены равномерно и одинаково загружены по всем венцам шарошек, реакция забоя приводится к паре сил, определяющих величину вращающего момента на ШД.

Далее проведем исследование кинематики ШД в процессе его работы в составе агрегата РТБ.

Из курса теоретической механики известно, что сумма двух вращений объекта вокруг параллельных осей, которые не образуют вращений, равна одному вращению вокруг мгновенной оси с угловой скоростью, равной векторной сумме угловых скоростей этих вращений. Причем мгновенная ось разделяет либо внешним, либо внутренним способом расстояние между осями составляющих вращений на части, которые обратно пропорциональны модулям угловых скоростей, в зависимости от направленности векторов этих скоростей [166].

Если вектор угловой скорости агрегата -  $\vec{\omega}_A$  и первого ШД -  $\vec{\omega}_{D_1}$  имеют одинаковое направление, то суммарная скорость определяется как  $\vec{\omega}_P = \vec{\omega}_A + \vec{\omega}_{D_1}$ , если же они разнонаправленные, то  $\vec{\omega}_P = \vec{\omega}_{D_1} - \vec{\omega}_A$  и будет иметь одинаковое направление с угловой скоростью, имеющей большую величину.

Мгновенный центр скоростей и параллельных сил не изменяют своих положений в пространстве при повороте на одинаковый угол осей вращения (векторов  $\vec{\omega}_A$  и  $\vec{\omega}_{D_1}$ ) при фиксированных точках приложения  $O$  и  $O_1$  (рисунок 2.27).



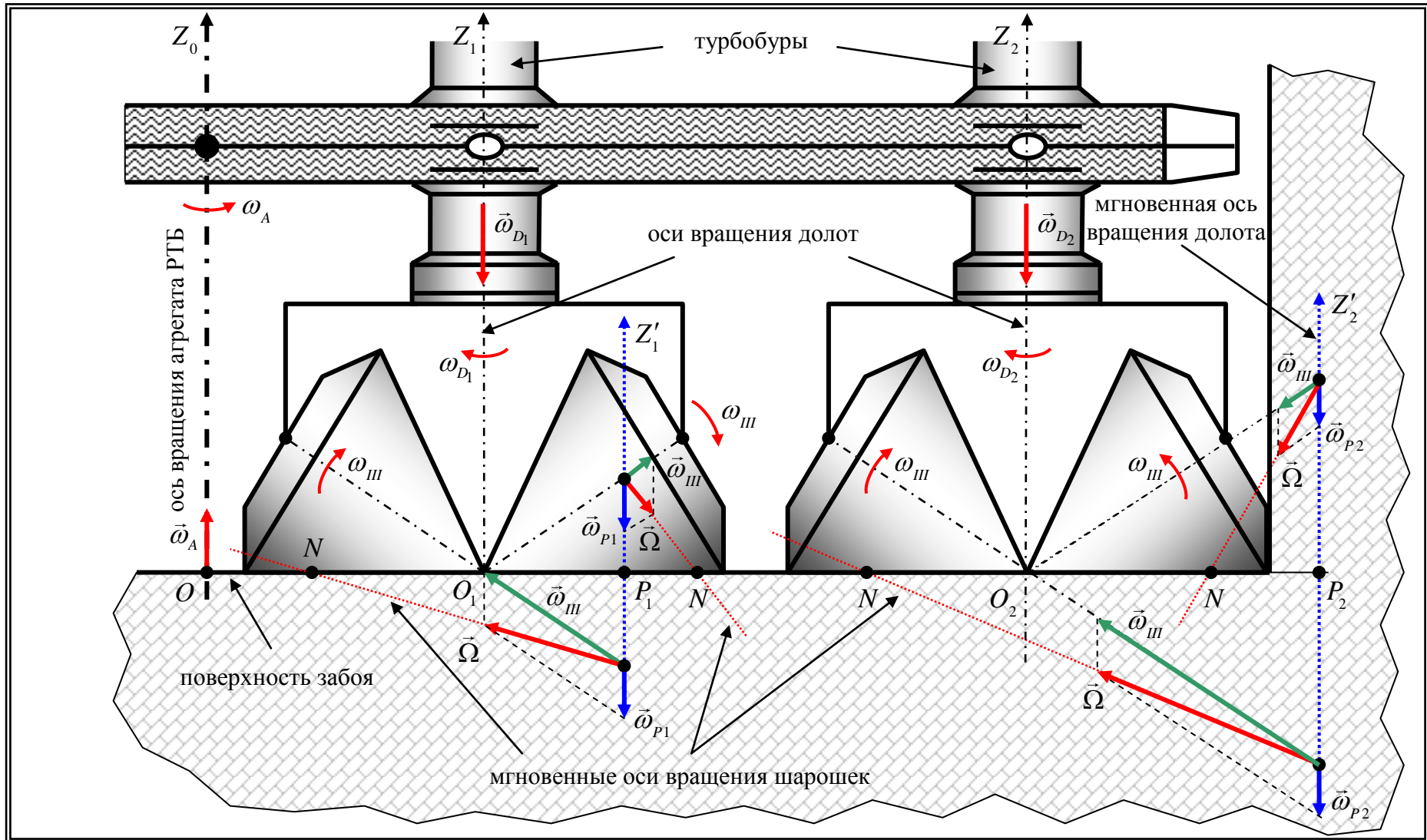


Рисунок 2.27 - Принципиальная схема для определения мгновенных центров скоростей

В связи с тем, что вращения  $\vec{\omega}_A$  и  $\vec{\omega}_{D_1}$  имеют различные направления

$$\vec{\omega}_R = \vec{\omega}_{D_1} - \vec{\omega}_A. \quad (2.101)$$

Точка  $P_1$  является мгновенным центром скоростей и в данном случае делит отрезок  $OO_1$  внутренним образом на две части обратно пропорционально модулям угловых скоростей.

Далее определяем расположение точки  $P_1$

$$\omega_A(OP_1) = \omega_{D_1}(O_1P_1); \quad (2.102)$$

$$\frac{\omega_{D_1}}{\omega_A} = \frac{OP_1}{O_1P_1}; \quad i_1 = \frac{OO_1 + O_1P_1}{O_1P_1}. \quad (2.103)$$

Тогда

$$O_1P_1 = \frac{OO_1}{i_1 - 1}. \quad (2.104)$$

Вращение вокруг двух осей  $Z_0$  и  $Z_1$  заменяем одним вокруг оси  $Z'_1$  с угловой скоростью  $\omega_R$ , в этом случае абсолютная скорость определяется как

$$\vec{\Omega} = \vec{\omega}_{III} + \vec{\omega}_R. \quad (2.105)$$

Аналогичным образом вычисляем абсолютную скорость шарошек второго ШД:

$$\vec{\Omega} = \vec{\omega}_{III} + \vec{\omega}_{P_2}. \quad (2.106).$$

Определив направление и величину абсолютной скорости, далее в заданный момент времени устанавливаем местоположение мгновенного центра скоростей  $N$  для каждой шарошки ШД. При этом точка  $N$  всегда будет располагаться на нижней, находящейся в соприкосновении с забоем, образующей шарошки, в месте пересечения ее линией вектора абсолютной скорости вращения.

Эффективность работы зубчатого вооружения ШД, работающего в составе агрегата РТБ, в значительной степени зависит от совокупности его геометрических параметров, поэтому важным моментом при проектировании вооружения является определение траектории движения зубьев ШД при РТБ.

Получить кинематическую информацию о любой интересующей точке зубьев вооружения ШД можно при помощи уравнений движения (рисунок 2.28):

$$\begin{cases} x = \varepsilon \sin \varphi_0 + x_1 \cos \varphi_0 + y_1 \sin \varphi_0 \\ y = \varepsilon \cos \varphi_0 - x_1 \sin \varphi_0 + y_1 \cos \varphi_0, \\ z = z_1 \end{cases} \quad (2.107)$$

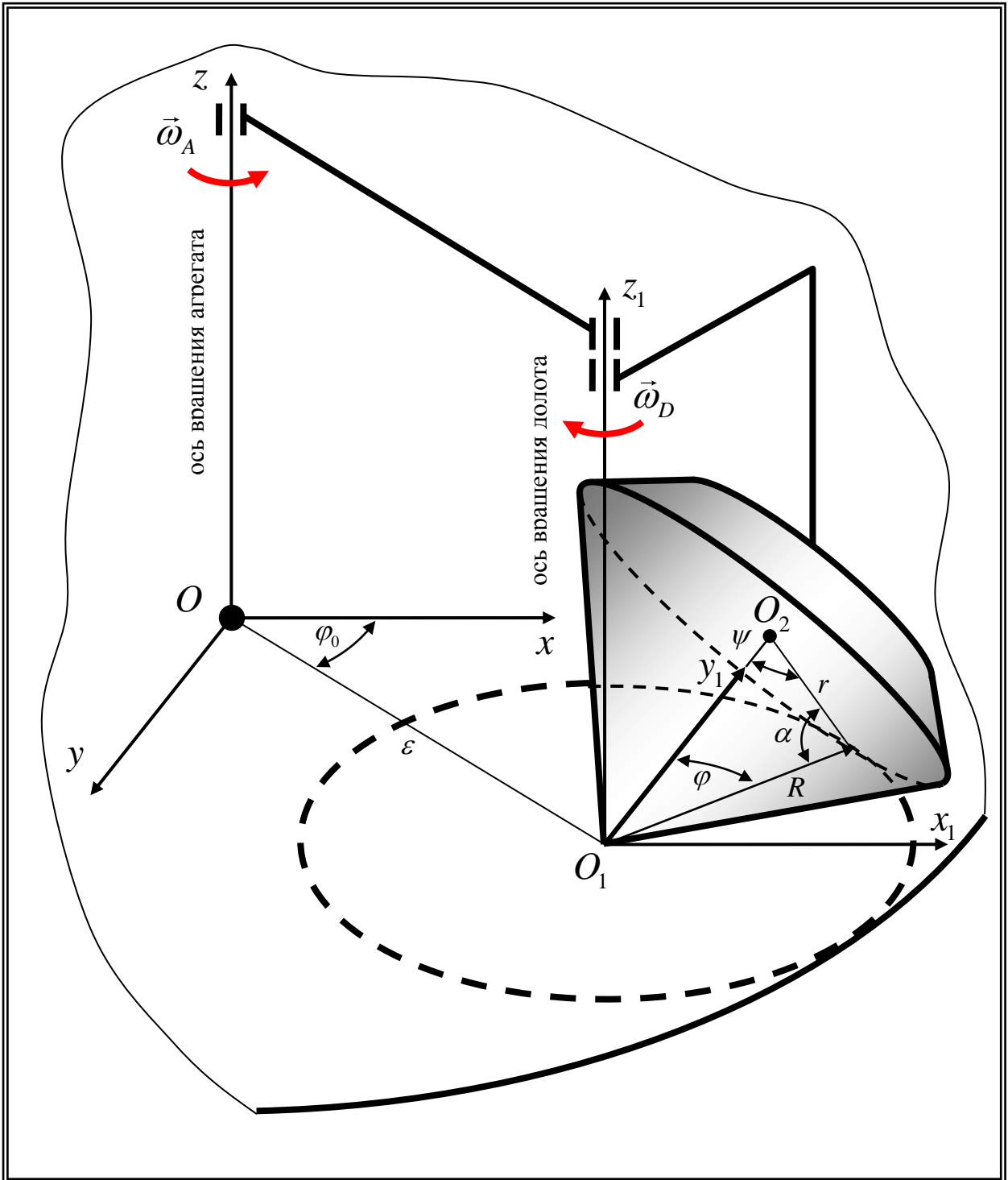


Рисунок 2.28 - Схема «перекатывания» шарошки при РТБ

где

$$\begin{aligned} x &= R \sin \varphi - r \sin \psi \cos(\varphi + \gamma) - r(1 - \cos \psi) \sin(\varphi + \gamma) \cos \alpha \\ y &= R \cos \varphi - r \sin \psi \sin(\varphi + \gamma) - r(1 - \cos \psi) \cos(\varphi + \gamma) \cos \alpha, \\ z &= r(1 - \cos \psi) \sin \alpha \end{aligned} \quad (2.108)$$

где  $r$  - радиус исследуемого венца, мм;  $R$  - радиус окружности, описываемой исследуемым венцом, мм;  $\gamma$  - угол смещения оси шарошки от оси вращения ШД, град.;

$\alpha$  - угол наклона венца к поверхности забоя, град.

при этом

$$\varphi = \omega_1 t; \psi = \omega_2 t; \gamma = \arctg\left(\frac{k}{R}\right); \varphi_0 = \omega_0 t; \quad (2.109)$$

$\omega_0$  - скорость вращения исполнительного органа агрегата РТБ;

$\omega_1$  - скорость вращения ШД;  $\omega_2$  - скорость вращения шарошки ШД;

$i_0 = \frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{\varphi}{\varphi_0}$ ; - передаточное число ШД;

$i = \frac{\omega_2}{\omega_0} = \frac{\psi}{\varphi}$ ; - передаточное число шарошки.

Таким образом, проведенные исследования и математическое моделирование процесса перекачивания шарошки ШД при РТБ позволили установить, что зубья вооружения бурового инструмента перемещаются по сложной траектории движения, с постоянно меняющимся во времени направлением и величиной проскальзывания, зависящими от положения шарошки относительно оси и направления вращения агрегата (рисунок 2.29), (рисунок 2.30).

## Выводы по главе 2

1 Исследование кинематики шарошек бурового инструмента позволило установить, что у подавляющего большинства существующих буровых долот со смещенными в плане осями вращения шарошек ориентация зубьев вооружения не обеспечивает их эффективную работу в условиях повышенного скольжения.

2 Было установлено, что для достижения увеличения площади поражения забоя необходимо располагать зубья вооружения под определенными углами по отношению к образующим шарошек. Наибольшая площадь поражения забоя по горизонтали и соответственно производительность ШБИ достигаются при геометрии зубчатого вооружения, когда большая сторона

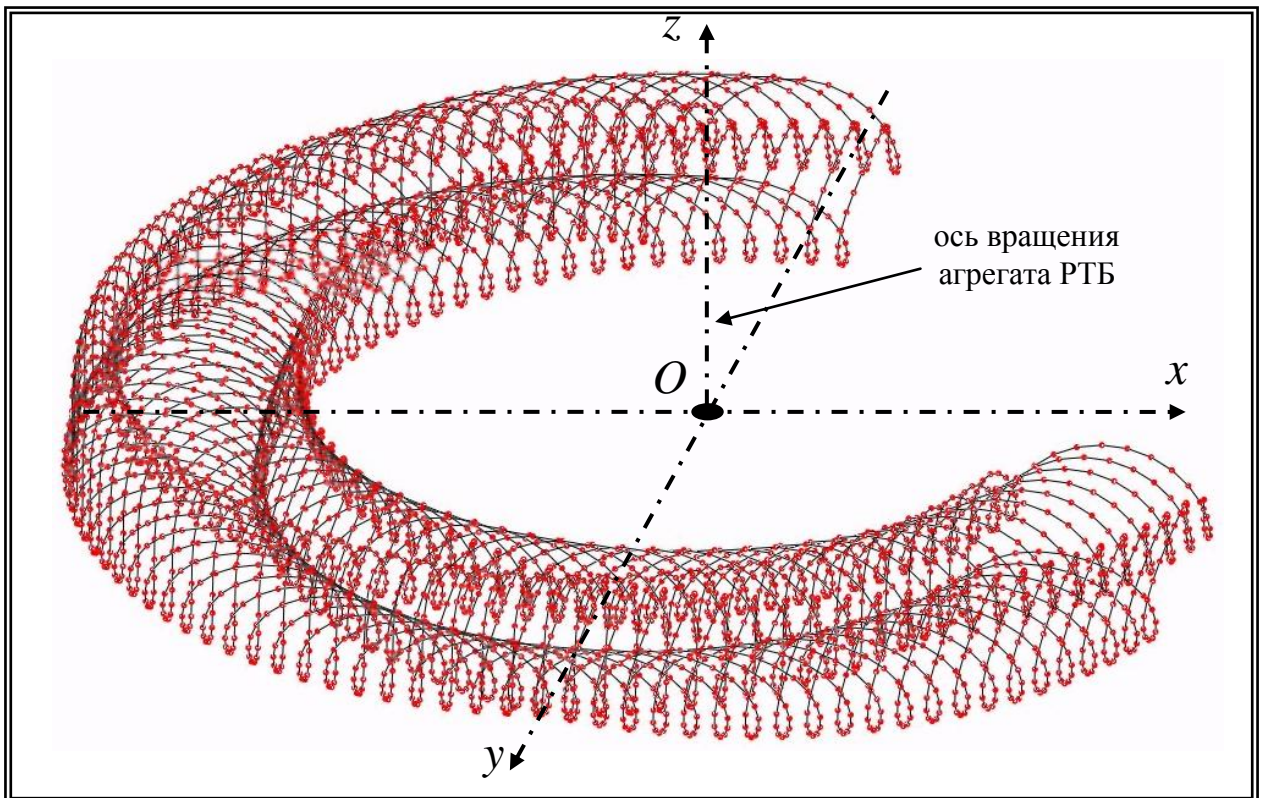


Рисунок 2.29 - Траектория движения вершины зуба шарошки при пробуксовке вооружения бурового долота в условиях РТБ

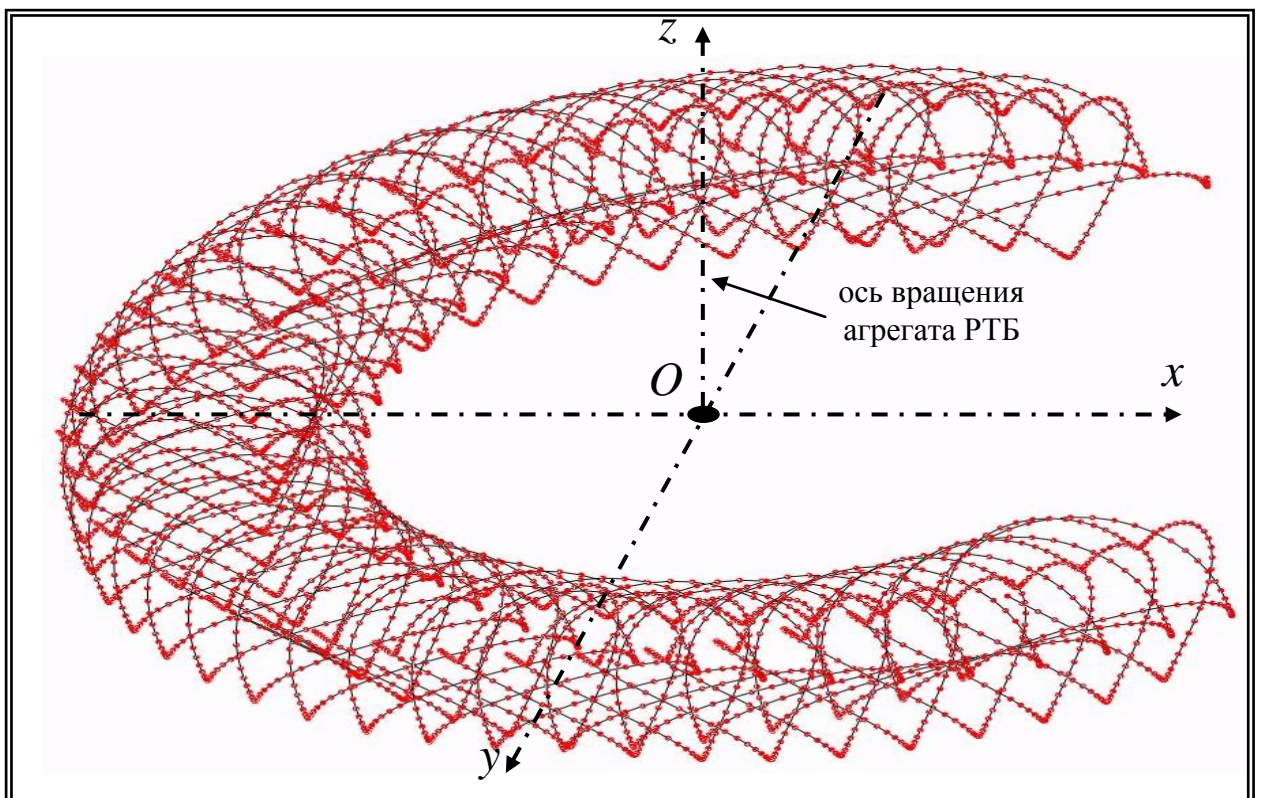


Рисунок 2.30 - Траектория движения вершины зуба шарошки при подтормаживании вооружения бурового долота в условиях РТБ

площадки притупления каждого зуба на каждом из венцов расположена под определенным углом к образующей шарошки, обеспечивающим ориентацию основных рабочих граней зубьев строго перпендикулярно по отношению к направлению результирующей скорости их скольжения.

3 КЗВ шарошек с минимальным или нулевым смещением осей их вращения относительно центра ШБИ не дает возможности увеличить общую площадь поражения забоя. Однако использование КЗВ позволяет повысить эффективность удаления шлама путем его механической эвакуации сквозь межзубное пространство из зоны непосредственного разрушения горной породы, а также улучшить выравнивание поверхности забоя за счет повышения фрезерующего эффекта КЗВ ШБИ.

4 Математическое моделирование процесса перекачивания шарошки бурового инструмента при бурении позволило определить и построить в трехмерном пространстве траектории движения всех зубьев каждого из венцов шарошечного бурового долота. В результате было установлено, что вершинные венцы шарошек работают с пробуксовкой вооружения, а периферийный с подтормаживанием, при этом существует некий средний (ведущий) венец вооружения, зубья которого работают без скольжения.

5 Исследование процесса проскальзывания зубчатого вооружения по забою позволило установить, что процесс пробуксовки зубчатого вооружения ШБИ с точки зрения площади поражения забоя в вертикальной плоскости является гораздо менее эффективным, чем процесс подтормаживания.

6 Новая методика для определения положения мгновенной оси вращения шарошки ШБИ (в основе которой лежит принцип наименьшей затраты мощности) позволяет с большей точностью выявлять расположение ведущего венца за счет вычисления координат нейтральных точек для каждого из основных осевых сечений шарошки, а также рассчитывать величины проскальзывания ведомых венцов вооружения ШБИ.

7 Проведенные исследования позволили определить, что для того чтобы повысить эффективность работы ШБИ при бурении мягких, не склонных к образованию забойной рейки горных пород за счет обеспечения максимального объема разрушаемой породы каждым зубом ведомых венцов его вооружения, необходимо, чтобы величины проскальзывания зубьев шарошек находилась в пределах [77]:

$$\Delta_{\beta} = (0,9 \div 1,1)R \left( 2 \sin \beta - \frac{\pi\beta}{180} \right) \text{ при подтормаживании;}$$

$$\Delta_{\beta} = (0,9 \div 1,1)R \left( \frac{\pi\beta}{180} - \frac{2}{3} \sin \beta \right) \text{ при пробуксовке,}$$

а также установить, что для того чтобы повысить эффективность работы ШБИ при бурении средних пород, склонных к рейкообразованию, за счет увеличения объема разрушенной породы за весь цикл работы инструмента, работающего в режиме пробуксовки вооружения, с одновременным качественным выравниванием поверхности забоя, необходимо, чтобы величина проскальзывания зубьев шарошек находилась в пределах

$$\Delta_{\beta} = (0,95 \div 1,05) R \left( \frac{\pi\beta}{180} - \frac{1}{2} \sin \beta \right).$$

Проектирование и изготовление новых конструкций зубчатого вооружения шарошек с учетом этих параметров позволят повысить эффективность работы ШБИ за счет увеличения механической скорости бурения и проходки на инструмент и снижения стоимости бурения.

8 Проведенное на основе математического моделирования исследование кинематики ШД в процессе его работе в составе агрегата РТБ позволило установить, что зубья вооружения ШБИ, перемещаются по сложной траектории движения, с постоянно меняющимися во времени направлением и величиной проскальзывания, зависящими от положения шарошки относительно оси и направления вращения агрегата. А также в результате проведенных расчетов было установлено, что при работе ШД, зубья вооружения которого распределены равномерно и одинаково загружены по всем венцам шарошек, реакция забоя приводится к паре сил, определяющих величину вращающего момента на ШД.

**ГЛАВА 3.****ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОСОЗУБОГО  
ВООРУЖЕНИЯ ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА С ЗАБОЕМ**

Проведенные в предыдущих главах исследования выявили существенные отличия в кинематике и характере воздействия на забой вооружения ШБИ различных типов. Так, если для ШД предназначенных для бурения твердых пород основным фактором является ударное и силовое воздействие на поверхность забоя, то с увеличением мягкости породы существенным фактором становится режущее воздействие зубчатых элементов. В связи с этим необходимо исследовать вопросы соответствия геометрии вооружения существующего в настоящее время бурового инструмента характеру и условиям бурения мягких и средних пород.

**3.1 Изучение факторов, влияющих на эффективность разрушения  
мягких и средних пород вооружением шарошек**

Множество исследований процесса бурения мягких и средних пород, проведенных учеными и инженерами, специализирующихся на разработке ШБИ, позволили установить, что работа зубьев отдельных венцов шарошек, работающих с проскальзыванием вооружения, сопровождается значительным режущим воздействием зубчатого вооружения ШБИ на породу забоя, которое было названо фрезерующим эффектом вооружения [51, 52].

Тем не менее и по настоящее время данный эффект остается до конца не изученным. Поэтому существует необходимость в проведении исследований этого явления, с целью дальнейшего совершенствования зубчатого вооружения шарошек, путем приведения геометрии их вооружения в соответствие с характером и условиями бурения ШБИ мягких и средних пород.

Согласно теории резания различных материалов, работа практически всех инструментов режущего типа основана на главном принципе, который сводится к следующему. Рабочая часть любого режущего инструмента по своей форме, как правило, представляет собой обыкновенный клин (рисунок 3.1). Под воздействием силы, прикладываемой к режущему инструменту, вершинная часть клина внедряется в поверхность обрабатываемого материала, нарушая сцепление его частиц и сдвигая отделяемый слой в сторону. При этом чем меньше величина угла заострения режущего инструмента, тем меньшая сила необходима для его успешного внедрения в материал, подвергаемый обработке [38]. На (рисунок 3.1.1) наглядно продемонстрировано, что врезание клина с меньшим или более острым углом требует значительно меньшей силы  $P$ , чем более широкого клина. Угол между основными сторонами клина получил название - угол заострения инструмента и обозначается как  $\beta$ .



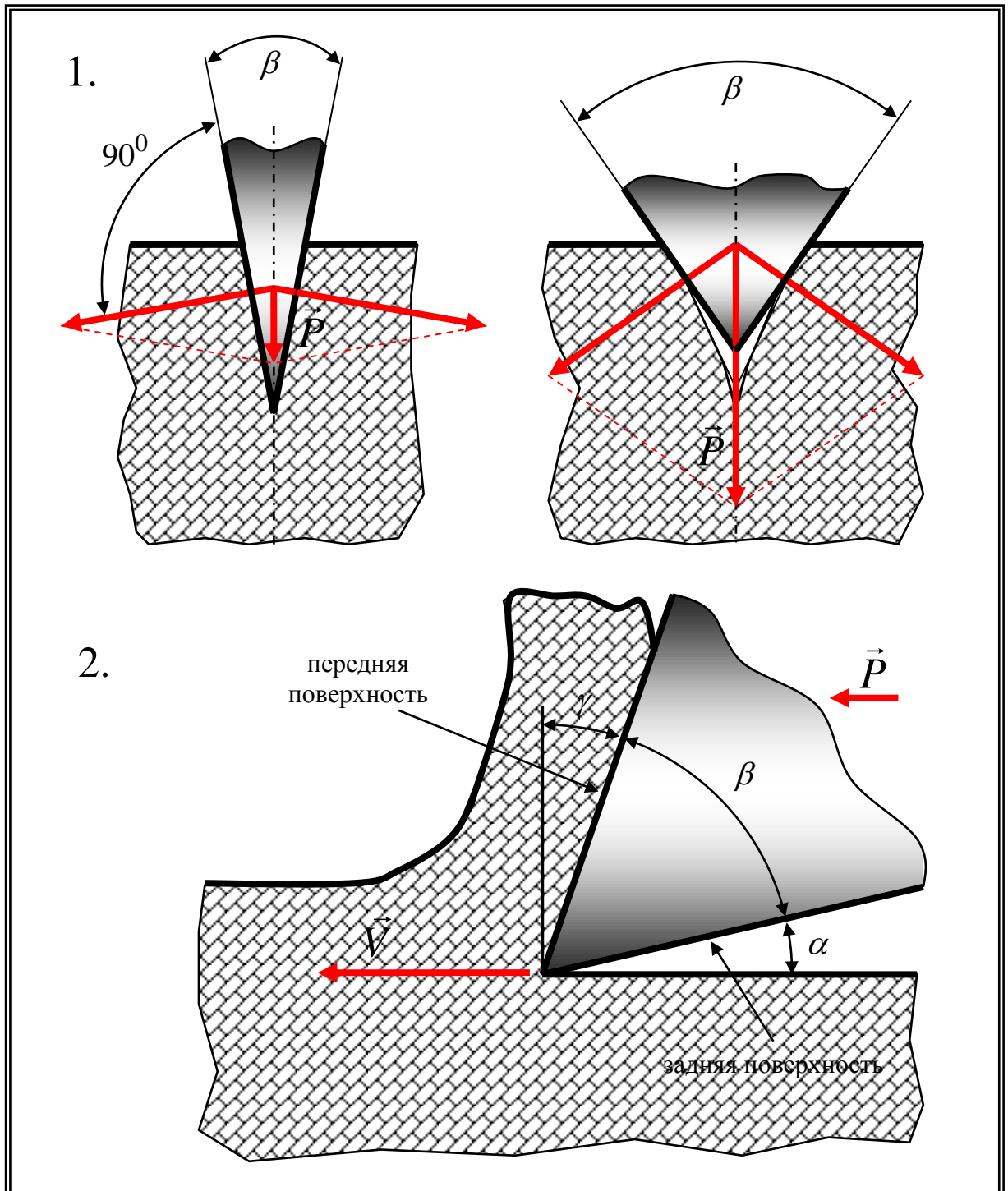


Рисунок 3.1 - Принципиальная схема резания материала

1 – по вертикали; 2 - по горизонтали

При этом силы, нормальные к режущим поверхностям режущего инструмента, больше в случае клина, обладающего меньшим углом  $\beta$ , чем для более широкого клина (рисунок 3.1.1).

Эти же принципы справедливы и для инструмента, работающего и в горизонтальной плоскости. На (рисунок 3.1.2) представлен элементарный резец, внедряющийся в обрабатываемую поверхность материала. Режущая или рабочая часть резца выполнена в форме клина с углом заострения  $\beta$ . Под действием силы  $P$  резец, перемещаясь вперед своей передней поверхностью, сначала осуществляет сжатие срезаемого слоя материала, затем, продолжая поступательное движение, эвакуирует его вверх; далее продвигаясь еще дальше, преодолевает внутренние силы сцепления частиц материала, надламывает и отводит вверх срезанный участок слоя.

Остановимся подробнее на элементах режущего инструмента. Угол, образованный между передней по направлению движения инструмента поверхностью резца и плоскостью, перпендикулярной к направлению резания, называется - передним углом резания и обозначается, как  $\gamma$  (рисунок 3.1.2). От величины этого угла существенно зависят силовые и температурные нагрузки, действующие на резец, его прочность и условия теплоотвода, а также легкость отделения обрабатываемого материала от массива.

Угол, образованный между направлением резания и задней поверхностью резца, называется – задним углом резания и обозначается, как  $\alpha$ . По существу, это угловой зазор, позволяющий исключить трение между задней поверхностью резца и поверхностью резания. Величина этого угла, в зависимости от угла  $\gamma$ , влияет не только на прочность режущего клина и условия теплоотвода из зоны резания, но и на интенсивность износа самого резца [38].

Как отмечалось ранее, при бурении мягких и средних пород зубчатое вооружение ШБИ воздействует на поверхность забоя одновременно в двух направлениях: вертикальном и горизонтальном. Осевая нагрузка на долото -  $Q$  создает вертикальную составляющую и обеспечивает внедрение зубьев породу. Горизонтальная - создается крутящим моментом на инструменте и обеспечивает проскальзывание зубчатого вооружения по забою [126]. Если рассмотреть зуб вооружения шарошки с точки зрения оказываемого им режущего эффекта, то при «резании» в вертикальной плоскости форма зуба в виде клина является практически эталонной, но в горизонтальной плоскости клиновидная геометрия зуба совсем не совершенна [34].

Наиболее близким инструментом с точки зрения характера его воздействия на обрабатываемый материал в горизонтальной и вертикальной плоскостях, к шарошке ШБИ является цилиндрическая фреза.

Проведем анализ общих и отличительных черт в работе зубьев цилиндрической фрезы при осуществлении попутного фрезерования и зубьев шарошки ШБИ, работающего с пробуксовкой вооружения (рисунок 3.2). Работу цилиндрической фрезы можно описать следующим образом. В процессе одновременного вращения инструмента и подачи обрабатываемой заго-

товки каждый последующий зуб фрезы срезает слой материала параболической формы (сегмент  $ABC$ ) (рисунок 3.2.1). В случае совпадения направления вращения фрезы и подачи обрабатываемой заготовки, в момент входа зуба инструмента в поверхность обрабатываемой заготовки глубина срезаемого слоя материала – максимальна, а в завершающий момент – минимальна. А в случае разнонаправленности вращений фрезы и подачи обрабатываемой заготовки в момент входа зуба инструмента в поверхность обрабатываемой заготовки глубина срезаемого слоя материала – минимальна, а в завершающий момент – максимальна.

Разрушение породы забоя зубчатым ведомым венцом шарошки, работающим с пробуксовкой или подтормаживанием вооружения, осуществляется практически по тому же принципу (рисунок 3.2.2.). Например, при перекатывании по забою каждый последующий зуб ведомого венца шарошки, работающего с пробуксовкой вооружения, создает в поверхности забоя лунку в форме параболического сегмента ( $ACD$ ). При этом в начальный и заключительный момент формирования лунки зубом вооружения шарошки глубина разрушаемого слоя породы – минимальна, а в вертикальном среднем положении – максимальна (точка  $C$ ).

Таким образом, два единичных цикла работы зуба цилиндрической фрезы при встречном и попутном фрезеровании аналогичны одному полному единичному циклу создания в поверхности забоя лунки зубом ведомого венца шарошки ШБИ, работающего с пробуксовкой вооружения. Поэтому работа шарошек ШБИ, предназначенных для бурения мягких и средних пород, подобна работе цилиндрических фрез. Следовательно, многие из конструктивных особенностей геометрических параметров рабочих поверхностей цилиндрической фрезы, способствующих повышению эффективности ее работы, могут быть использованы при создании новых конструкций зубчатого вооружения ШБИ.

Цилиндрическая фреза представляет собой многозубый режущий инструмент, каждый зубчатый элемент которой является, по сути, простейшим резцом. На (рисунок 3.2.1) представлены основные геометрические элементы цилиндрической фрезы: передняя поверхность 1, режущая кромка 2, задняя поверхность 3, затылочная поверхность или спинка 4, ленточка –  $f$ .

Передний угол резания -  $\gamma$  измеряется в плоскости, которая расположена перпендикулярно по отношению к режущей кромке. Он может быть как положительным, так и отрицательным. Угол заострения -  $\beta$  образован передней и задней поверхностями и зависит от величины переднего и заднего углов резания. Задний угол резания -  $\alpha$  измеряется в плоскости, которая расположена перпендикулярно по отношению к оси фрезы, т. е. в плоскости торца фрезы.

Для того чтобы повысить прочность зубьев фрезы необходимо увеличивать угол заострения  $\beta$ , однако увеличение этого угла приводит к снижению способности зуба врезаться в

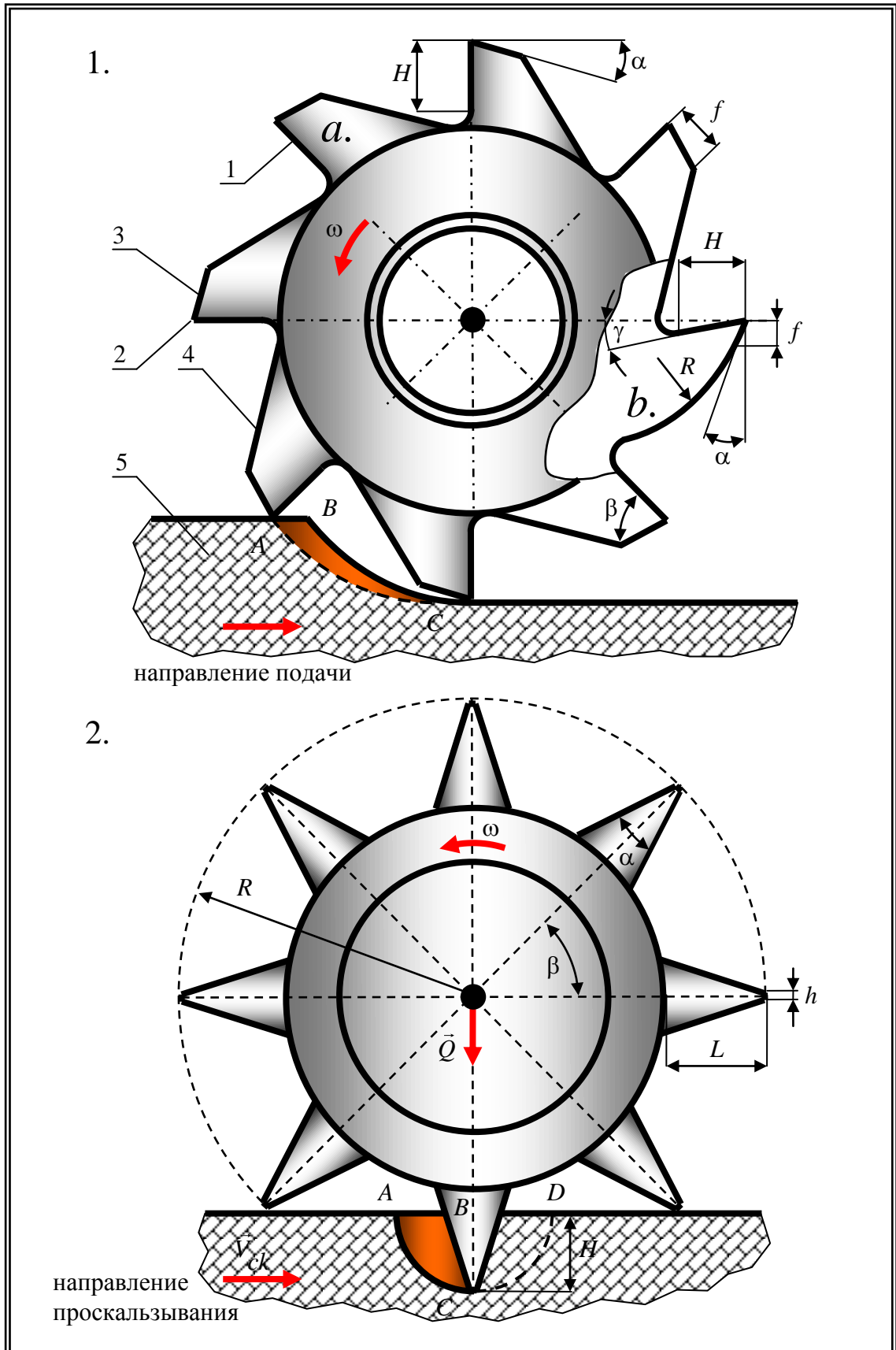


Рисунок 3.2 - Схемы работы различных инструментов

1 - цилиндрическая фреза с формой зубьев (а. трапецеидальной, б. параболической);

2 - шарошка ШБИ, работающая с пробуксовкой вооружения

обрабатываемый материал, к увеличению потребляемой мощности на фрезерование и к значительному повышению температуры резания. Также увеличение этого угла приводит к необходимости уменьшать передний угол резания  $\gamma$ , который зачастую может принимать отрицательные значения.

Наибольшее распространение, на сегодняшний день имеют цилиндрические фрезы с параболической и трапецеидальной формами зубьев. Трапецеидальная фреза (рисунок 3.2.1.а) является наиболее простой в изготовлении, однако ее зубья несколько ослаблены, поэтому имеют большую высоту и малые объемы стружечных канавок. Зубья с параболической формой (рисунок 3.2.1.б) обладают самой большой прочностью на изгиб, так как спинка зуба, изготовленная в виде параболы, обеспечивает равномерную прочность зуба во всех сечениях по его высоте. Цилиндрические фрезы могут изготавливаться как с прямыми, так и с винтовыми зубьями. У последних режущая кромка выполнена в виде винтовой линии (спирали). При этом угол, образованный между режущей кромкой и осью фрезы, называется углом наклона винтовой канавки и обозначается  $\omega$ . Создание этого угла способствует увеличению плавности работы фрезы, а также задает направление эвакуации срезаемого материала. Обычно его величина находится в пределах  $10 \div 55^\circ$ .

Однако, несмотря на тот факт, что процесс фрезерования цилиндрическими фрезами во многом напоминает условия работы вооружения шарошек бурового долота, работающего со скольжением, имеется и ряд существенных отличий. Основным из них является постоянное изменение направлений воздействия сил реакции забоя на зубья вооружения ШБИ в течение каждого единичного цикла лункообразования. Что приводит к соответствующему постоянному изменению углов атаки (резания) основных поверхностей зубьев вооружения шарошек.

На основе анализа основных этапов воздействия зуба вооружения шарошки бурового инструмента на породу забоя (вхождение зуба в поверхность забоя, его перемещение по криволинейной траектории в породе и выход на поверхность забоя) было установлено, что за время единичного цикла обработки лунки передняя по отношению к направлению проскальзывания грань зуба изменяет свой угол атаки (передний угол резания) от острого до тупого.

Таким образом, изучение факторов, влияющих на эффективность разрушения мягких и средних пород зубчатым вооружением ШБИ, позволило установить, что работа ведомых венцов шарошек, работающих с проскальзыванием вооружения, подобна работе цилиндрических фрез и, соответственно, многие из конструктивных особенностей геометрических параметров рабочих поверхностей цилиндрической фрезы, способствующих повышению эффективности ее работы, могут быть использованы при создании новых конструкций зубчатого вооружения ШБИ.

### 3.2 Исследование процесса силового взаимодействия зубьев вооружения шарошек с забоем

Проведем исследование процесса разрушения породы зубьями ведомых венцов шарошек ШБИ, работающих с пробуксовкой вооружения. Зубья вооружения удерживаются в заглубленном состоянии осевым усилием  $Q$ , а разрушение породы происходит за счет взаимного действия сил  $Q$  и  $P$ . В свою очередь внедрению зубчатого вооружения в породу забоя препятствуют силы  $N_1$ ,  $N_2$ , а также силы трения  $F_1$ ,  $F_2$ .

Для определения величин сил нормального давления  $N_1$  и  $N_2$  можно воспользоваться следующими выражениями [14, 50]:

$$N_1 = \sigma_v S_1; \text{ и } N_2 = \sigma_v S_2, \quad (3.1)$$

где  $\sigma_v$  - предел прочности горной породы;

$S_1$  - площадь взаимодействия зуба с породой по площадке притупления;

$S_2$  - площадь взаимодействия передней (по направлению проскальзывания) грани зуба с породой.

Возникающие в процессе разрушения породы силы трения определяются как

$$F_1 = N_1 \mu; \text{ и } F_2 = N_2 \mu, \quad (3.2)$$

при этом коэффициент трения  $\mu$  равен

$$\mu = \operatorname{tg} \varphi_x; \quad (3.3)$$

где  $\varphi_x$  - является углом трения.

Тогда становится очевидным, что процесс разрушения породы забоя может осуществляться успешно только при выполнении следующего условия

$$|\vec{Q}| \geq |\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{N}_1 + \vec{N}_2|. \quad (3.4)$$

Чтобы определить взаимное влияние сил  $Q$  и  $P$  в зависимости от пространственного расположения зуба вооружения, спроецируем последовательно все действующие на него силы на вертикальную и горизонтальную плоскости.

Сначала определим загруженность зубчатого вооружения шарошки в момент вхождения первого зуба - 1 в поверхность забоя (режим пробуксовки) (рисунок 3.3).

- Первый вариант (рисунок 3.3.1).

Зуб шарошки № 1:

Осуществим проецирование всех сил на ось  $Z$ :

$$F_2^1 \sin(\alpha + \beta) + N_1^1 \sin \beta - F_1^1 \cos \beta - N_2^1 \cos(\alpha + \beta) = 0; \quad (3.5)$$

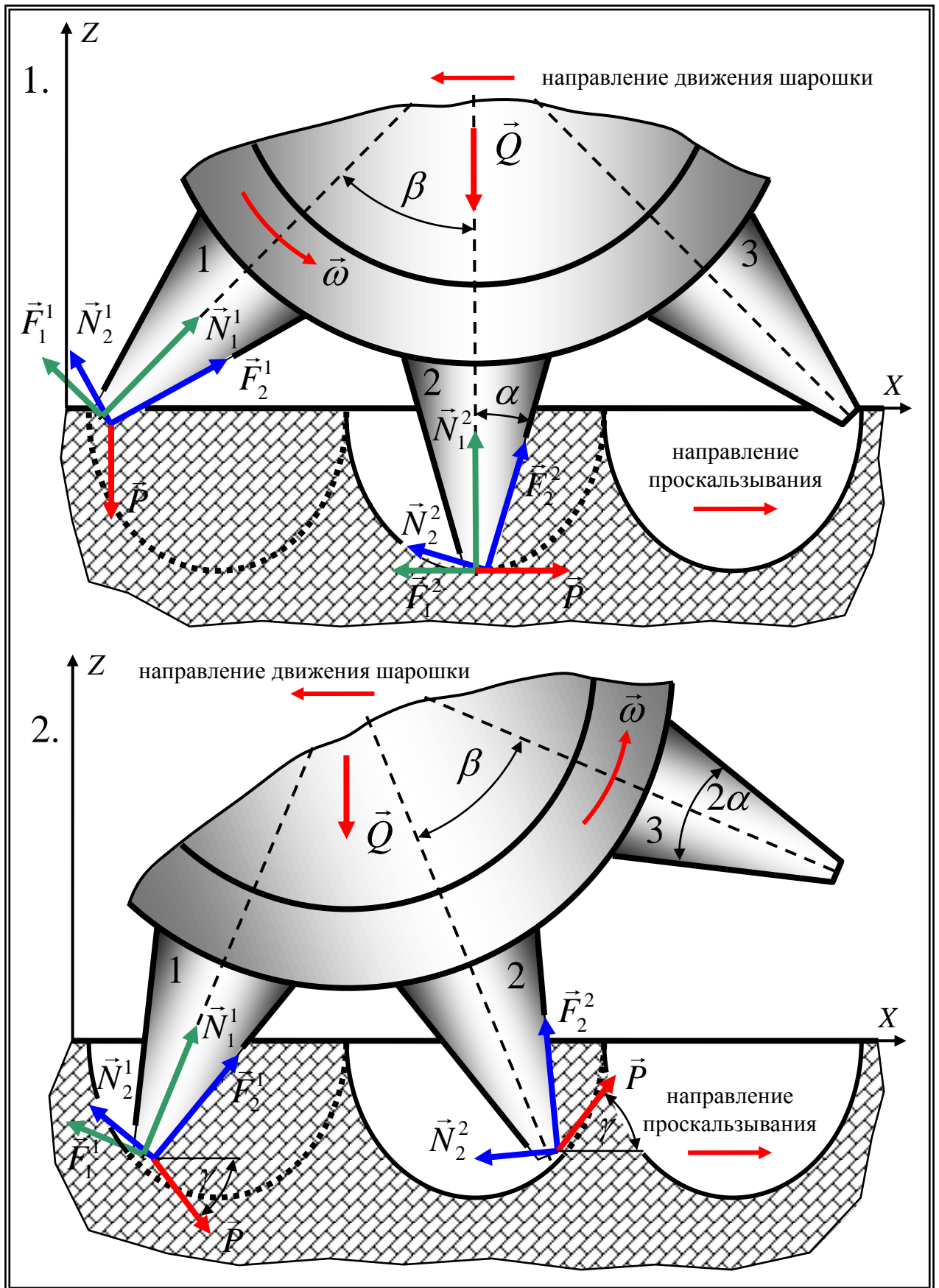


Рисунок 3.3 - Схема работы шарошки при пробуксовке ее зубчатого вооружения

$$N_1^1 = \sigma_v S; \text{ и } N_2^1 = \sigma_{ck} S. \quad (3.6)$$

Силы трения определяются как

$$F_1^1 = N_1^1 \mu; \text{ и } F_2^1 = N_2^1 \mu, \quad (3.7)$$

тогда сила нормального давления, действующая на переднюю поверхность зуба (по направлению проскальзывания), определится как

$$N_2^1 = \frac{F_2^1 \sin(\alpha + \beta) - F_1^1 \cos \beta + N_1^1 \sin \beta}{\cos(\alpha + \beta)} = \frac{N_1^1 (\sin \beta - \mu \cos \beta)}{\cos(\alpha + \beta) - \mu \sin(\alpha + \beta)}. \quad (3.8)$$

Осуществим проецирование всех сил на ось  $X$  :

$$Q = F_1^1 \sin \beta + N_2^1 \sin(\alpha + \beta) + N_1^1 \cos \beta + F_2^1 \cos(\alpha + \beta) - P; \quad (3.9)$$

$$Q = N_1^1 \mu \sin \beta + N_2^1 \sin(\alpha + \beta) + N_1^1 \cos \beta + N_2^1 \mu \cos(\alpha + \beta) - P. \quad (3.10)$$

Выражая из уравнения (3.10) величину  $P$ , получаем

$$P = N_1^1 \left[ \frac{[\cos(\alpha + \beta) - \mu \sin(\alpha + \beta)] + (\sin \beta - \mu \cos \beta) [\sin(\alpha + \beta) + \mu \cos(\alpha + \beta)]}{(\cos \beta + \mu \sin \beta)(\cos(\alpha + \beta) - \mu \sin(\alpha + \beta))} \right] - Q. \quad (3.11)$$

Зуб шарошки № 2:

Осуществим проецирование всех сил на ось  $Z$  :

$$F_2^2 \sin \alpha - F_1^2 - N_2^2 \cos \alpha + P = 0; \quad (3.12)$$

определим силы нормального давления, исходя из того, что

$$N_1^2 = \sigma_v S; \text{ и } N_2^2 = \sigma_{ck} S; \quad (3.13)$$

силы трения равны:

$$F_1^2 = N_1^2 \mu; \text{ и } F_2^2 = N_2^2 \mu, \quad (3.14)$$

тогда сила нормального давления, действующая на переднюю поверхность зуба (по направлению проскальзывания), определится как

$$N_2^2 = \frac{F_2^2 \sin \alpha - F_1^2 + P}{\cos \alpha} = \frac{N_2^2 \mu \sin \alpha - N_1^2 \mu + P}{\cos \alpha} = \frac{P - N_1^2 \mu}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}. \quad (3.15)$$

Осуществим проецирование всех сил на ось  $X$

$$-Q + N_1^2 + F_2^2 \cos \alpha + N_2^2 \sin 2\alpha = 0; \quad (3.16)$$

$$Q = N_1^2 + N_2^2 \mu \cos \alpha + N_2^2 \sin 2\alpha = N_1^2 + N_2^2 (\mu \cos \alpha + \sin 2\alpha); \quad (3.17)$$

$$Q = \frac{N_1^2 [(\cos \alpha - \mu \sin \alpha) - \mu(\mu \cos \alpha + \sin 2\alpha)] + P(\mu \cos \alpha + \sin 2\alpha)}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}. \quad (3.18)$$

Выражая из уравнения (3.18) величину  $P$ , получаем



$$P = \frac{Q(\cos \alpha - \mu \sin \alpha) - N_1^2 [(\cos \alpha - \mu \sin \alpha) - \mu(\mu \cos \alpha + \sin 2\alpha)]}{\mu \cos \alpha + \sin 2\alpha}. \quad (3.19)$$

- Второй вариант (рисунок 3.3.2).

Зуб шарошки № 1:

Осуществим проецирование всех сил на ось  $Z$

$$F_2^1 \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) + N_1^1 \sin \frac{\beta}{2} - F_1^1 \cos \frac{\beta}{2} - N_2^1 \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) + P \cos \gamma = 0; \quad (3.20)$$

определим силы нормального давления, исходя из того, что

$$N_1^1 = \sigma_v S; \text{ и } N_2^1 = \sigma_{ck} S. \quad (3.21)$$

Силы трения равны

$$F_1^1 = N_1^1 \mu; \text{ и } F_2^1 = N_2^1 \mu, \quad (3.22)$$

тогда сила нормального давления, действующая на переднюю поверхность зуба (по направлению проскальзывания), определится как

$$N_2^1 = \frac{F_2^1 \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) - F_1^1 \cos \frac{\beta}{2} + N_1^1 \sin \frac{\beta}{2} + P \cos \gamma}{\cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right)} = \frac{N_1^1 \left(\sin \frac{\beta}{2} - \mu \cos \frac{\beta}{2}\right) + P \cos \gamma}{\cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) - \mu \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right)}. \quad (3.23)$$

Осуществим проецирование всех сил на ось  $X$

$$Q = F_1^1 \sin \frac{\beta}{2} + N_2^1 \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) + N_1^1 \cos \frac{\beta}{2} + F_2^1 \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) - P \sin \gamma; \quad (3.24)$$

$$Q = N_1^1 \mu \sin \frac{\beta}{2} + N_2^1 \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) + N_1^1 \cos \frac{\beta}{2} + N_2^1 \mu \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) - P \sin \gamma. \quad (3.25)$$

Выражая из уравнения (3.25) величину  $P$ , получаем (3.26)

$$P = \frac{Q \left[ \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) - \mu \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \right]}{\left[ \cos \gamma \left( \mu \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) + \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \right) - \sin \gamma \left( \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) - \mu \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \right) \right]} - \frac{N_1^1 \left[ \left( \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) - \mu \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \right) \left( \mu \sin \frac{\beta}{2} + \cos \frac{\beta}{2} \right) + \left( \sin \frac{\beta}{2} - \mu \cos \frac{\beta}{2} \right) \left( \mu \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) + \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \right) \right]}{\left[ \cos \gamma \left( \mu \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) + \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \right) - \sin \gamma \left( \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) - \mu \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \right) \right]}$$

Теперь определим загруженность зубьев шарошек бурового инструмента, работающих в режиме подтормаживания вооружения (рисунок 3.4).

- Третий вариант (рисунок 3.4.1).

Зуб шарошки № 1:

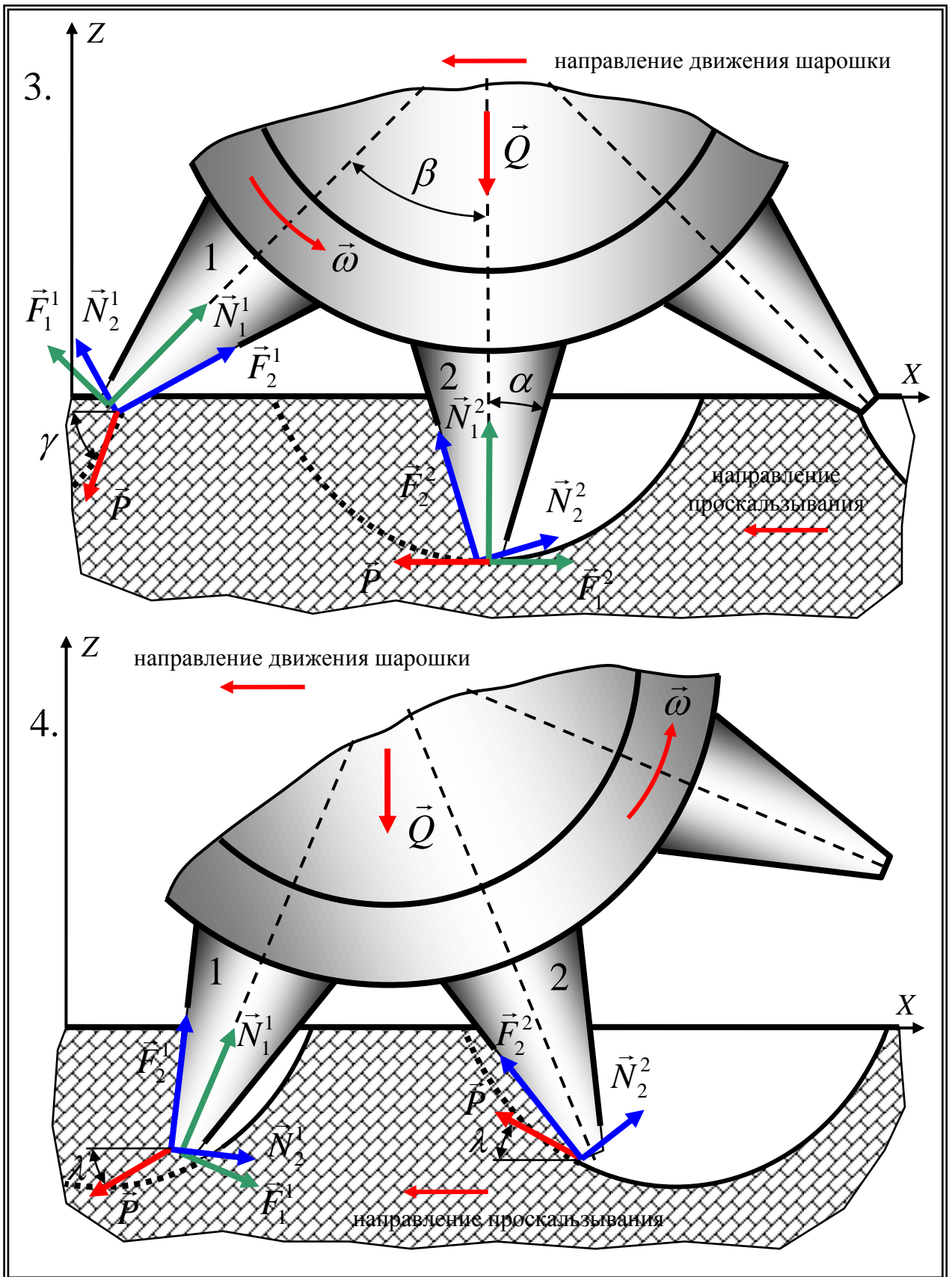


Рисунок 3.4 – Схема работы шарошки при подтормаживании ее зубчатого вооружения

Осуществим проецирование всех сил на ось  $Z$  :

$$F_2^1 \sin(\alpha + \beta) + N_1^1 \sin \beta - F_1^1 \cos \beta - N_2^1 \cos(\alpha + \beta) - P \cos \gamma = 0, \quad (3.27)$$

определим силы нормального давления, исходя из того, что

$$N_1^1 = \sigma_v S; \text{ и } N_2^1 = \sigma_{ck} S. \quad (3.28)$$

Силы трения равны:

$$F_1^1 = N_1^1 \mu; \text{ и } F_2^1 = N_2^1 \mu, \quad (3.29)$$

тогда сила нормального давления, действующая на переднюю поверхность зуба (по направлению проскальзывания), определится как

$$N_2^1 = \frac{F_2^1 \sin(\alpha + \beta) - F_1^1 \cos \beta + N_1^1 \sin \beta - P \cos \gamma}{\cos(\alpha + \beta)} = \frac{N_1^1 (\sin \beta - \mu \cos \beta) - P \cos \gamma}{\cos(\alpha + \beta) - \mu \sin(\alpha + \beta)}. \quad (3.30)$$

Осуществим проецирование всех сил на ось  $X$  :

$$Q = F_1^1 \sin \beta + N_2^1 \sin(\alpha + \beta) + N_1^1 \cos \beta + F_2^1 \cos(\alpha + \beta) - P \sin \gamma; \quad (3.31)$$

$$Q = N_1^1 \mu \sin \beta + N_2^1 \sin(\alpha + \beta) + N_1^1 \cos \beta + N_2^1 \mu \cos(\alpha + \beta) - P \sin \gamma; \quad (3.32)$$

Выражая из уравнения (3.32) величину  $P$ , получаем (3.33)

$$P = \frac{Q}{\sin \gamma} - N_1^1 \left[ \frac{[\cos(\alpha + \beta) - \mu \sin(\alpha + \beta)] + (\sin \beta - \mu \cos \beta)[\sin(\alpha + \beta) + \mu \cos(\alpha + \beta)]}{(\cos \beta + \mu \sin \beta)(\cos(\alpha + \beta) - \mu \sin(\alpha + \beta)) \sin \gamma} \right].$$

Зуб шарошки № 2:

Осуществим проецирование всех сил на ось  $Z$  :

$$F_2^2 \sin \alpha - F_1^2 - N_2^2 \cos \alpha + P = 0, \quad (3.34)$$

определим силы нормального давления, исходя из того, что:

$$N_1^2 = \sigma_v S; \text{ и } N_2^2 = \sigma_{ck} S. \quad (3.35)$$

Силы трения равны:

$$F_1^2 = N_1^2 \mu; \text{ и } F_2^2 = N_2^2 \mu, \quad (3.36)$$

тогда сила нормального давления, действующая на переднюю поверхность зуба (по направлению проскальзывания), определится как:

$$N_2^2 = \frac{F_1^2 - F_2^2 \sin \alpha - P}{\cos \alpha} = \frac{N_1^2 \mu - N_2^2 \mu \sin \alpha - P}{\cos \alpha} = \frac{N_1^2 \mu - P}{\cos \alpha + \mu \sin \alpha}. \quad (3.37)$$

Осуществим проецирование всех сил на ось  $X$  :

$$-Q + N_1^2 + F_2^2 \cos \alpha + N_2^2 \sin 2\alpha = 0; \quad (3.38)$$

$$Q = N_1^2 + N_2^2 \mu \cos \alpha + N_2^2 \sin 2\alpha = N_1^2 + N_2^2 (\mu \cos \alpha + \sin 2\alpha). \quad (3.39)$$

Выражая из уравнения (3.39) величину  $P$ , получаем

$$P = \frac{N_1^2 \left[ (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) - \mu (\mu \cos \alpha + \sin 2\alpha) \right] - Q (\cos \alpha + \mu \sin \alpha)}{(\mu \cos \alpha + \sin 2\alpha)}. \quad (3.40)$$

- Четвертый вариант (рисунок 3.4.2).

Зуб шарошки №1:

Осуществим проецирование всех сил на ось  $Z$  :

$$F_1^1 \cos \frac{\beta}{2} + N_2^1 \cos \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) + N_1^1 \sin \frac{\beta}{2} + F_2^1 \sin \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) - P \cos \gamma = 0, \quad (3.41)$$

определим силы нормального давления, исходя из того, что

$$N_1^1 = \sigma_v S; \text{ и } N_2^1 = \sigma_{ck} S. \quad (3.42)$$

Силы трения равны:

$$F_1^1 = N_1^1 \mu; \text{ и } F_2^1 = N_2^1 \mu, \quad (3.43)$$

тогда сила нормального давления, действующая на переднюю поверхность зуба (по направлению проскальзывания), определится как

$$N_2^1 = \frac{P \cos \gamma - F_2^1 \sin \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) - F_1^1 \cos \frac{\beta}{2} - N_1^1 \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right)} = \frac{P \cos \gamma - N_1^1 \left( \sin \frac{\beta}{2} + \mu \cos \frac{\beta}{2} \right)}{\cos \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) + \mu \sin \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right)}. \quad (3.44)$$

Осуществим проецирование всех сил на ось  $X$  :

$$Q = N_1^1 \cos \frac{\beta}{2} + F_2^1 \cos \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) - F_1^1 \sin \frac{\beta}{2} - N_2^1 \sin \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) - P \sin \gamma; \quad (3.45)$$

$$Q = N_1^1 \cos \frac{\beta}{2} + N_2^1 \mu \cos \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) - N_1^1 \mu \sin \frac{\beta}{2} - N_2^1 \sin \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) - P \sin \gamma. \quad (3.46)$$

Выражая из уравнения (3.46) величину  $P$ , получаем (3.47)

$$P = \frac{Q \left[ \cos \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) + \mu \sin \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) \right]}{\cos \gamma \left( \mu \cos \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) - \sin \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) \right) - \sin \gamma \left( \cos \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) + \mu \sin \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) \right)} - \frac{N_1^1 \left[ \left( \cos \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) + \mu \sin \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) \right) \left( \sin \frac{\beta}{2} + \mu \cos \frac{\beta}{2} \right) - \left( \sin \frac{\beta}{2} + \mu \cos \frac{\beta}{2} \right) \left( \mu \cos \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) - \sin \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) \right) \right]}{\cos \gamma \left( \mu \cos \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) - \sin \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) \right) - \sin \gamma \left( \cos \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) + \mu \sin \left( \frac{\beta}{2} - \alpha \right) \right)}$$

В результате, можно рассчитывать величины сил, требуемых для успешного разрушения породы зубьями ведомых венцов шарошек ШБИ, работающих с пробуксовкой вооружения, для различных положений зубьев относительно поверхности забоя. Аналогичные силы по величине, но обратные по направлению, будут восприниматься зубьями вооружения ШБИ.

Изучим возможность уменьшить эти усилия за счет корректирования геометрии зубчатого вооружения шарошек. На (рисунок 3.5) показана принципиальная схема нагружения симметричных зубьев ведомых венцов шарошек ШБИ, работающих с пробуксовкой вооружения.

Главным отличием в работе зубьев вооружения шарошек и цилиндрических фрез является разность траекторий движения зубьев во время воздействия на обрабатываемые ими поверхности. В то время как зубья фрезы перемещаются (с определенным допущением) вокруг оси вращения инструмента по окружности, то зубья вооружения ведомых венцов шарошек, работающих с проскальзыванием вооружения, при взаимодействии с породой забоя вращаются относительно не оси шарошки, а ее мгновенной оси вращения. В результате каждый зуб вооружения, при взаимодействии с породой, двигается не по окружности, а по параболической траектории. Поэтому в процессе лункообразования в породе забоя зуб вооружения шарошки работает с постоянно изменяющимися во времени передним и задним углами резания, в зависимости от его положения относительно разрушаемой поверхности. Например, в момент (точка *A*) врезания зуба в породу забоя величина переднего угла резания положительна, однако в процессе дальнейшего продвижения зуба в породе, начиная примерно с точки *C* он становится отрицательным и принимает существенное отрицательное значение в точке *G*. Аналогичные изменения происходят и с углом резания.

Одними из основных характеристик, оказывающих существенное влияние на повышение эффективности резания пластичных и мягких материалов, являются угол заострения зуба и его передний угол резания. В связи с этим необходимо разработать такую геометрию зубчатого вооружения шарошек, с учетом вышеуказанных характеристик, которая позволила бы максимально повысить эффективность разрушения мягких и средних пород в процессе работы ШБИ.

Как было уже отмечено, первая часть траектории «резания» зуба - кривая "*A–C*" является наиболее нагруженной для зубчатого вооружения шарошки. Поэтому в первую очередь необходимо изучить процесс воздействия зуба на породу забоя именно на этом участке. В момент врезания зуба в породу забоя (точка *A*) передняя (набегающая грань) и задняя (площадка притупления) рабочие поверхности симметричного зуба вооружения ШБИ образуют своеобразный клин, имеющий большой угол заострения. Это объясняется тем, что хотя в этот момент передняя – набегающая поверхность зуба образует незначительный острый передний угол, задняя поверхность резца (площадка притупления зуба) расположена таким образом, что образует существенный отрицательный задний угол резания. При дальнейшем продвижении зуба, согласно траектории его движения, представленной на (рисунок 3.5) продвижении зуба от точки *A* к точке *C* происходят плавные, но существенные изменения этих параметров до значений, при которых передний угол резания становится равным одной второй угла заострения зуба, а задний становится равным нулю.

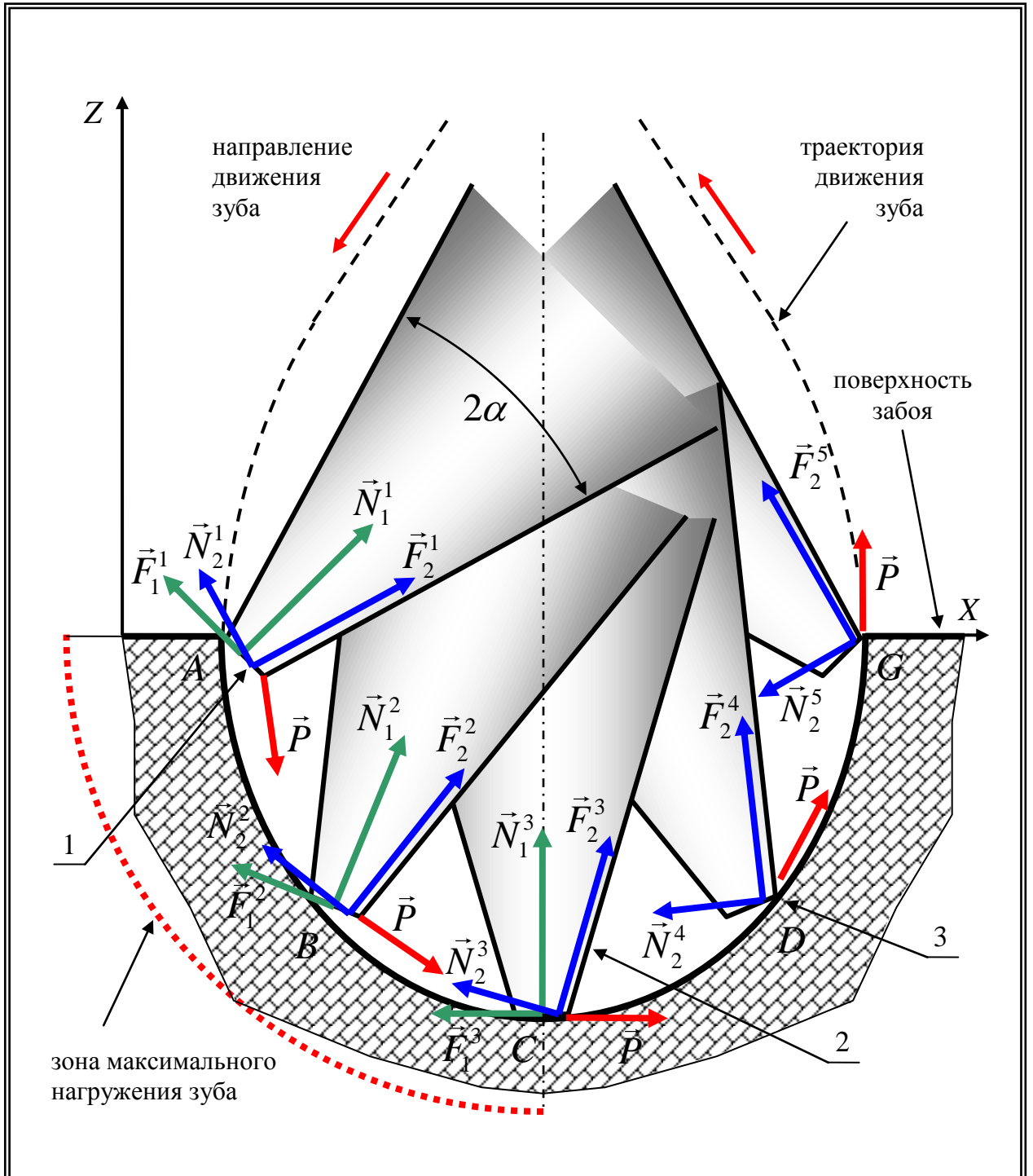


Рисунок 3.5 - Схема последовательного нагружения симметричного зуба, работающего при пробуксовке вооружения

1 - задняя поверхность (площадка притупления зуба); 2 – передняя грань, по направлению скольжения зуба; 3 - кромка режущая

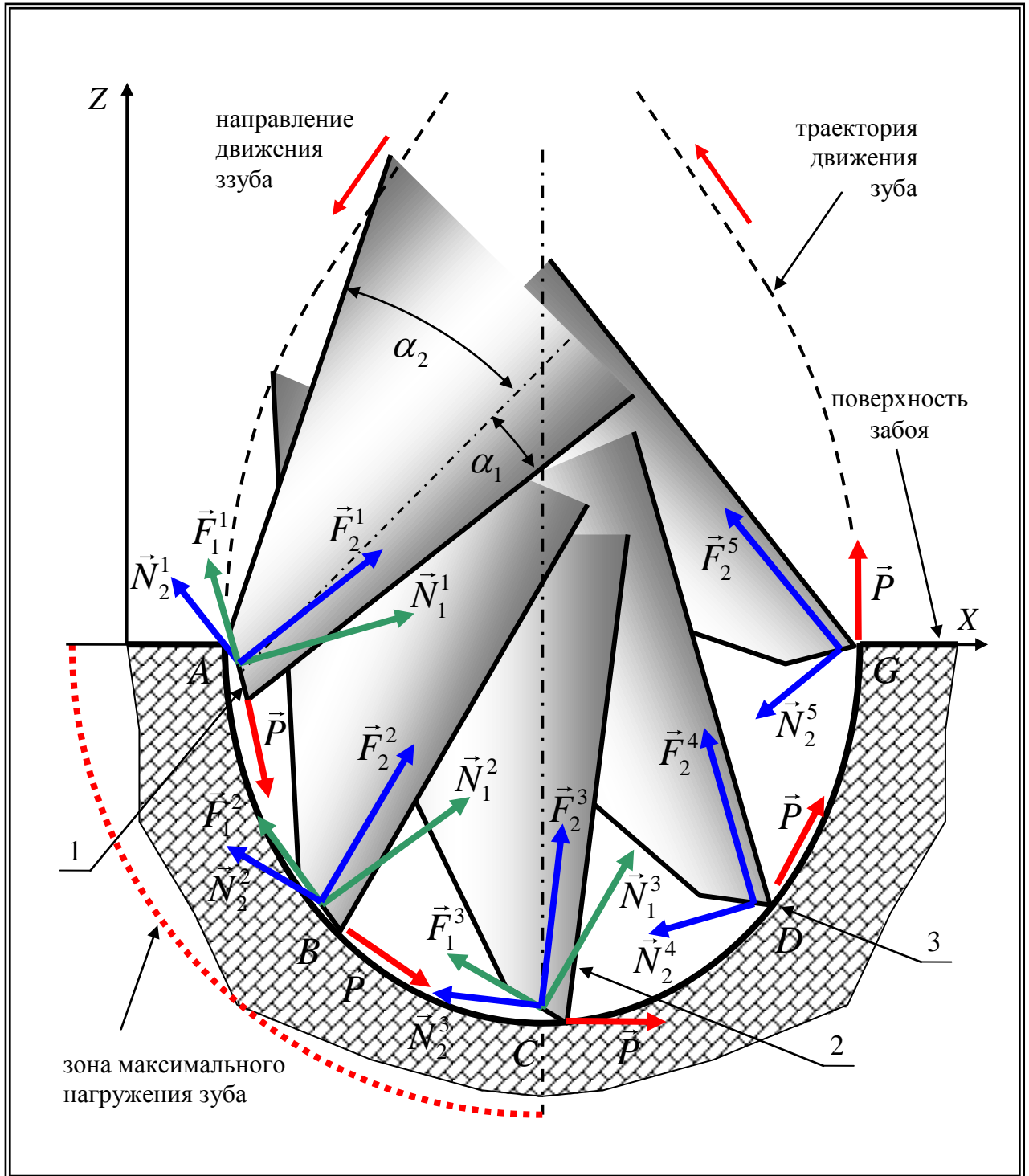


Рисунок 3.6 - Схема последовательного нагружения асимметричного ззуба, работающего при пробуксовке вооружения

1 - задняя поверхность (площадка притупления ззуба); 2 – передняя грань, по направлению скольжения ззуба; 3 - кромка режущая

Чтобы улучшить режущую способность зубьев вооружения шарошек, нужно уменьшить задний и передний углы резания. Это можно обеспечить за счет придания зубьям асимметричной формы с наклонными площадками притупления (рисунок 3.6), что дает возможность уменьшить величину переднего угла на  $\alpha - \alpha_1$ , а заднего, на величину, ограничивающуюся только прочностными характеристиками вершинной части зуба. Это позволит существенно уменьшить величину клина, образованного между набегающей гранью и задней поверхностью (площадкой притупления) зуба в момент его врезания в породу забоя (точка А), что приведет к снижению нагрузок, испытываемых как зубчатым вооружением, так и всеми остальными частями ШБИ. Аналогичная картина наблюдается на всем участке траектории "А-С".

Чтобы определить величину снижения нагрузки на вооружение ШБИ при оснащении его асимметричными зубьями с наклонными площадками притупления, осуществим сравнительный расчет сил, возникающих при работе симметричных и асимметричных зубьев ШБИ.

Для начала определим величины сил в точках А, В и С, требуемых для успешного разрушения породы, симметричным  $P_C$  и асимметричным  $P_A$  зубом.

Первое положение (точка А): (3.48)

$$\left\{ \begin{aligned} P_C &= N_1^1 \left[ \frac{[\cos(\alpha + \beta) - \mu \sin(\alpha + \beta)] + (\sin \beta - \mu \cos \beta)[\sin(\alpha + \beta) + \mu \cos(\alpha + \beta)]}{(\cos \beta + \mu \sin \beta)(\cos(\alpha + \beta) - \mu \sin(\alpha + \beta))} \right] - Q \\ P_A &= N_1^1 \left[ \frac{[\cos(\alpha_1 + \beta) - \mu \sin(\alpha_1 + \beta)]}{(\cos(\beta + \psi) + \mu \sin(\beta + \psi))(\cos(\alpha_1 + \beta) - \mu \sin(\alpha_1 + \beta))} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{[\sin(\beta + \psi) - \mu \cos(\beta + \psi)][\sin(\alpha_1 + \beta) + \mu \cos(\alpha_1 + \beta)]}{(\cos(\beta + \psi) + \mu \sin(\beta + \psi))(\cos(\alpha_1 + \beta) - \mu \sin(\alpha_1 + \beta))} \right] - Q \end{aligned} \right.$$

Второе положение (точка В): (3.49)

$$\left\{ \begin{aligned} P_C &= \frac{Q \left[ \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) - \mu \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \right]}{\left[ \cos \gamma \left( \mu \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) + \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \right) - \sin \gamma \left( \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) - \mu \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \right) \right]} - \\ &\quad N_1^1 \left[ \left( \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) - \mu \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \right) \left( \mu \sin \frac{\beta}{2} + \cos \frac{\beta}{2} \right) + \left( \sin \frac{\beta}{2} - \mu \cos \frac{\beta}{2} \right) \left( \mu \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) + \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \right) \right], \\ P_A &= \frac{Q(\cos \eta - \mu \sin \eta)}{\cos \gamma (\mu \cos \eta + \sin \eta) - \sin \gamma (\cos \eta - \mu \sin \eta)} - \\ &\quad N_1^1 \left[ \left( \cos \eta - \mu \sin \eta \right) \left( \mu \sin\left(\frac{\beta}{2} + \psi\right) + \cos\left(\frac{\beta}{2} + \psi\right) \right) + \left( \sin\left(\frac{\beta}{2} + \psi\right) - \mu \cos\left(\frac{\beta}{2} + \psi\right) \right) \left( \mu \cos \eta + \sin \eta \right) \right]; \end{aligned} \right.$$



где

$$\eta = \alpha_1 + \frac{\beta}{2} + \psi. \quad (3.50)$$

Третье положение (точка  $C$ ):

$$\left[ \begin{array}{l} P_C = \frac{Q(\cos \alpha - \mu \sin \alpha) - N_1^2 [(\cos \alpha - \mu \sin \alpha) - \mu(\mu \cos \alpha + \sin 2\alpha)]}{\mu \cos \alpha + \sin 2\alpha} \\ P_A = \frac{Q(\cos \alpha_1 - \mu \sin \alpha_1) - N_1^2 [(\cos \alpha_1 - \mu \sin \alpha_1) - \mu(\mu \cos \alpha_1 + \sin 2\alpha_1)]}{\mu \cos \alpha_1 + \sin 2\alpha_1} \end{array} \right]. \quad (3.51)$$

При подстановке в формулы реальных численных значений, соответствующих геометрии вооружения ШБИ для бурения мягких пород, величины асимметрии  $\alpha - \alpha_1 \approx 10^\circ$  и угла наклона площадки притупления к оси зуба  $\psi = (10 \div 20^\circ)$ , величина разницы между значениями  $P_C$  и  $P_A$  в некоторых случаях достигает 25-30 %, в сторону уменьшения для асимметричного вооружения.

Таким образом, проведенное исследование процесса силового взаимодействия зубьев вооружения шарошек с забоем позволило установить, что придание зубьям ведомых венцов шарошек ШБИ, работающих в режиме проскальзывания вооружения, асимметричной формы с наклонными площадками притупления, позволяет значительно снизить энергоемкость процесса разрушения породы и одновременно уменьшить нагрузки, действующие на зубчатое вооружение и другие элементы ШБИ.

### 3.3 Исследование работы шарошечного бурового инструмента в процессе бурения мягких и средних пород

Одним из основных факторов, определяющих эффективность работы ШБИ, является интенсивность разрушения горной породы зубьями каждого из венцов вооружения шарошек. Чтобы повысить работоспособность шарошек инструмента, нужно на всех венцах создавать энергию такой величины, при которой объем разрушаемой породы зубьями его вооружения был бы максимальным.

Шарошечные долота, предназначенные для разбуривания мягких и средних пород, оснащаются шарошками, смещенными в плане и имеющими многоконусный профиль, значительно отличающийся от формы подвижного аксоида, формируемого при вращении тела вокруг пересекающихся осей. Сочетание двух этих факторов и обеспечивает наличие у этого типа ШБИ эффекта скольжения зубчатого вооружения в процессе перемещения его шарошек по поверхности забоя.

Зубчатые венцы на шарошках располагают с таким расчетом, чтобы они обеспечивали полное поражение разбуриваемой поверхности. Зубья формируют в виде клиньев, вершины которых располагаются либо в осевых плоскостях шарошек, либо смещены относительно них на определенный угол. Основные боковые поверхности зубьев, как правило, выполняются плоскими с равными по площади рабочими поверхностями, при этом обеспечивается смещение осей шарошек относительно оси вращения долота.

Используемые в настоящее время методики проектирования шарошечного бурового инструмента, работающего со скольжением зубчатого вооружения, не позволяют обеспечить равномерность распределения объемной работы разрушения породы забоя, между всеми венцами вооружения с учетом геометрии зубьев, их ориентации, направления и совершаемого ими проскальзывания.

Как было установлено ранее, основные боковые рабочие поверхности зубьев каждого из венцов вооружения, необходимо располагать под определенным углом к направлению результирующей скорости скольжения. При этом зубья предпочтительно изготавливать асимметричной формы, позволяющей обеспечить повышение эффективности разрушения породы забоя за счет уменьшения переднего угла резания -  $\psi_{ki}$  (рисунок 3.7).

Многочисленные исследования процессов разрушения горных пород позволили установить, что при незначительном внедрении зубьев вооружения шарошек (не больше чем на 2-3 мм) отделяемая от массива порода не скользит, а преимущественно откалывается передней по отношению к направлению проскальзывания рабочей поверхностью зуба и в дальнейшем удаляется промывочной жидкостью [87]. Тогда в первом приближении можно считать, что реакция забоя, действующая на вершину зуба, распределяется равномерно по всей его длине и складывается из составляющей нормальной силы  $\vec{R}$ ; силы трения скольжения  $\vec{F}_T$ ; а также силы сопротивления разрушению породы  $\vec{F}_C$ . Наиболее вероятное направление силы  $\vec{R}$  к оси шарошки - перпендикулярно вершине зуба, а силы  $\vec{F}_T$  - в сторону, противоположную направлению абсолютной скорости  $\vec{V}_A$  (рисунок 3.7).

Вследствие конструктивных особенностей ШБИ в процессе его работы зубья различных венцов вооружения внедряются в породу на разную глубину по отношению к направлению действия силы  $\vec{R}$ . Максимальные углубления достигаются на участках забоя, перпендикулярных оси вращения долота. Во всех остальных случаях углубление зуба происходит на величину максимального заглубления умноженного на  $\cos \delta$  (угол, образуемый направлением равнодействующей нормальных сил  $\vec{R}$ , действующей на данный зуб, и противоположным направлением осевой нагрузки на инструмент  $\vec{Q}$ ).

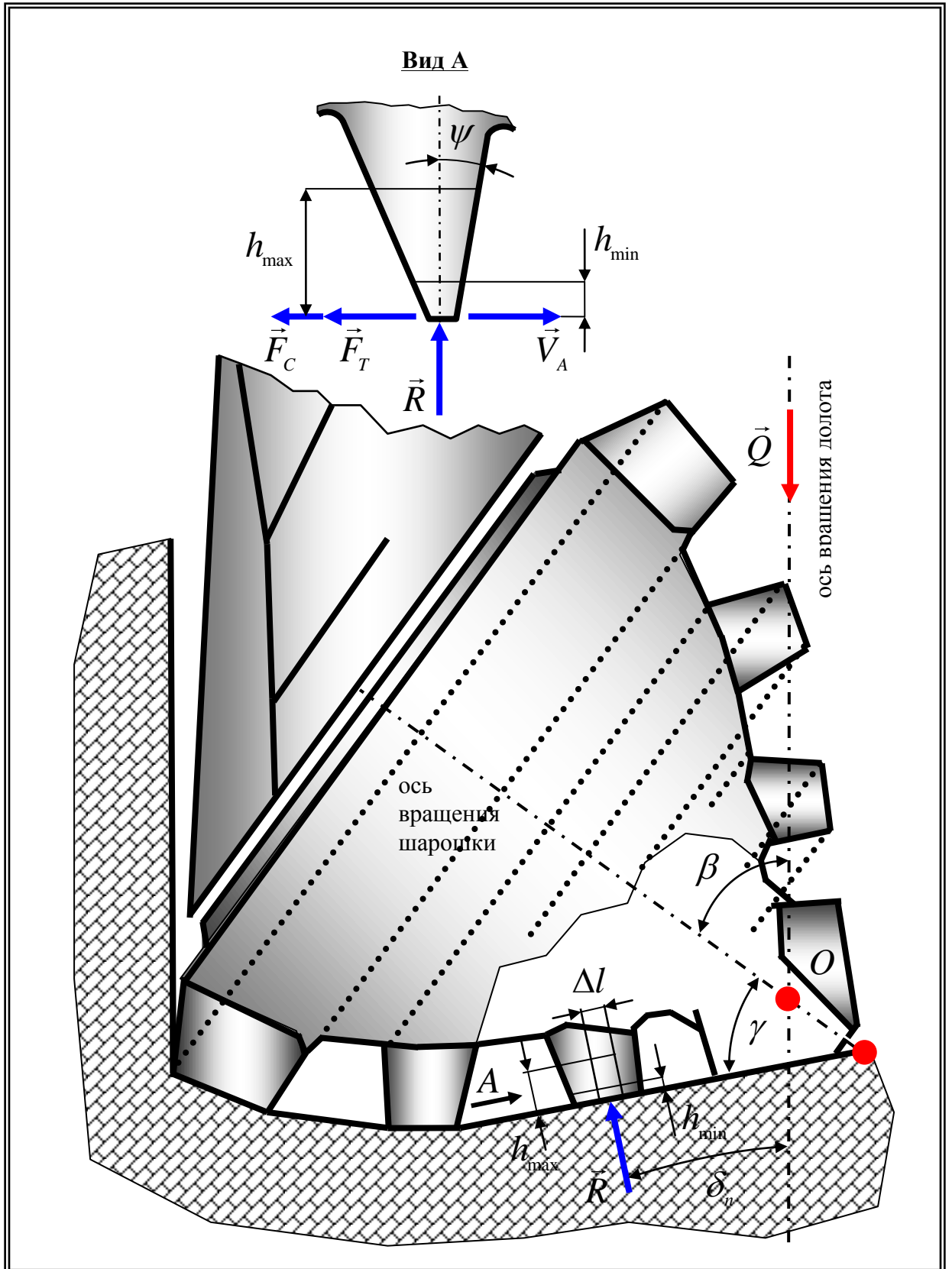


Рисунок 3.7 - Принципиальная схема взаимодействия зубьев вооружения с поверхностью забоя

Следовательно,  $\delta$  является углом воздействия нормальной составляющей реакции забоя. Известно, что в диапазоне рабочих нагрузок заглублиение зуба в породу по нормали к его поверхности прямо пропорционально величине удельного давления, действующего на него. В таком случае для  $i$ -го зуба на  $n$ -ом венце шарошки справедливо выражение [87]

$$q_{ni} = q_{\max} \cos \delta_{ni} = q_{\max} \left( -\vec{R}_{ni}^0 \vec{Q}^0 \right), \quad (3.52)$$

где

$q_{ni}$  - удельное давление на зуб вооружения;

$q_{\max}$  - максимальное удельное давление в случае, когда равнодействующая нормальных сил  $\vec{R}_{ni}$  совпадает с обратным направлением силы  $\vec{Q}$ ;

$\left( -\vec{R}_{ni}^0 \vec{Q}^0 \right)$  - скалярное произведение единичных векторов сил  $\vec{R}$  и  $\vec{Q}$ .

Величина силы трения скольжения  $F_T$  по закону Амонтона - Кулона пропорциональна нормальной силе. В таком случае для элементарной длины  $\Delta l$  вершинной части зуба данную силу можно записать как

$$\Delta F_T = f \Delta R = f q \Delta l, \quad (3.53)$$

где  $f$  - коэффициент трения скольжения.

Результаты исследований многочисленных авторов свидетельствуют о том, что сила сопротивления разрушения горных пород зубьями вооружения шарошек прямо пропорциональна глубине  $h$  и ширине  $l$  разрушаемого поверхностного слоя и зависит от многочисленных факторов, таких как скорость резания, физико-механические свойства породы, геометрия зубчатого вооружения, степень его износа, количество и качество промывочной жидкости и т. д.

Как отмечалось ранее зубья вооружения шарошек, работающие в режиме пробуксовки или подтормаживания, обрабатывают поверхность забоя подобно резцам. В связи с этим, на основе зависимости глубины внедрения зуба в породу от создаваемого им удельного давления можно вычислить силу сопротивления разрушению породы на элементарной длине  $\Delta l$  вершинной части зуба [87]

$$\Delta F_C = c_1 h \Delta l = c_2 q \Delta l, \quad (3.54)$$

где

$c_1$  и  $c_2$  — первый и второй коэффициенты пропорциональности соответственно.

В связи с тем, что формулы для определения  $\Delta F_T$  и  $\Delta F_C$  имеют различия лишь в безразмерных коэффициентах, а силы трения скольжения, приложенные к вершинной части зуба, и силы сопротивления разрушению породы направлены одинаково, для упрощения задачи эти

выражения можно объединить. В этом случае суммарная сила сопротивления для элементарной длины  $\Delta l$   $i$ -го зуба в  $n$ -ом венце, запишется как

$$\Delta F_{ni} = cq_{ni}\Delta l = cq_{\max} \cos \delta_{ni}\Delta l. \quad (3.55)$$

Для определения единичного вектора этой силы можно воспользоваться формулой:

$$\vec{F}_{ni}^0 = -\vec{V}_{Ani}^0 = -\frac{\vec{V}_{Ani}}{V_{Ani}}. \quad (3.56)$$

В данном случае  $\vec{F}_{ni}^0$  и  $\vec{V}_{Ani}^0$  - являются единичными векторами суммарной силы сопротивления породы и абсолютной скорости скольжения для любой точки вершинной части зуба, а  $\vec{V}_{Ani}$  и  $V_{Ani}$  - соответственно вектор и величина абсолютной скорости в рассматриваемой точке.

Для определения вектора суммарной силы сопротивления разрушению горной породы для элементарной длины  $\Delta l$  вершинной части зуба можно использовать формулу [87]

$$\vec{F}_{ni} = -\left(\frac{\vec{V}_{Ani}}{V_{Ani}}\right) cq_{\max} \cos \delta_{ni}\Delta l. \quad (3.57)$$

Тогда работа, затрачиваемая на разрушение горной породы, изнашивание вооружения и теплообразование на длине  $\Delta l$   $i$ -го зуба,  $k$ -ого венца шарошки за время  $t$  единичного полного оборота долота, будет равна:

$$\Delta A_{ni} = \Delta \vec{F}_{ni} \vec{V}_{Ani} t; \quad (3.58)$$

Как отмечалось ранее, работа ШБИ при бурении мягких и средних пород сопровождается процессом проскальзывания зубьев вооружения в момент их соприкосновения с забоем скважины. При этом разные венцы вооружения каждой из шарошек, имеют свои собственные величины и направления этого скольжения. Главной особенностью этого процесса является противоположность скольжений периферийных и вершинных венцов в рамках одной шарошки и наличием ведущего венца определяющего скорость вращения шарошки, а следовательно, передаточное отношение системы «долото-шарошка».

Анализ многочисленных теоретических и экспериментальных данных свидетельствует о том, что среднее передаточное отношение шарошки и ШД в условиях установившегося режима бурения является величиной относительно постоянной и может достаточно точно рассчитываться. Чтобы определить направления и величины скольжения зубьев каждого венца шарошки и далее величины сил, необходимых каждому зубу вооружения для успешного разрушения породы, необходимо знать координаты ведущего венца, который и определяет закон движения шарошки.

Важность определения положения мгновенной оси вращения шарошки на этапе проектирования ШБИ вызвана возможностью управлять величинами проскальзывания вооружения каждого венца шарошки с целью повышения эффективности работы бурового инструмента.

Однако значительное количество экспериментальных данных свидетельствуют о том, что вращение шарошки в пределах одного собственного оборота происходит неравномерно [104], тогда кинематические параметры зубьев долота, вычисленные по средним значениям передаточных отношений, будут существенно отличаться от действительных.

Поэтому была разработана новая методика определения положения мгновенной оси вращения, базирующаяся на принципе наименьшей затраты мощности (пункт 2.5), позволяющая вычислять угол наклона мгновенной оси вращения по отношению к оси вращения шарошки ШБИ (формула 2.69), для каждого из наиболее характерных осевых сечений.

Созданная методика позволяет уже на стадии проектирования ШБИ задавать величины проскальзывания зубьев, различных венцов вооружения, а также определять положение ведущего венца и передаточное отношение для каждой из шарошек бурового инструмента.

Зная направления и величины скольжений зубьев всех венцов шарошки бурового инструмента, можно определить величины сил, требующихся для наиболее эффективного разрушения горной породы забоя при проскальзывании вооружения ШБИ.

В связи с тем, что разрушение породы забоя, связанное с проскальзыванием зубчатого вооружения, в основном происходит под действием крутящего момента на инструменте, изучим его распределение между всеми исполнительными органами ШБИ.

Крутящий момент на ШД, при одинаковой геометрии вооружения всех шарошек (рисунок 3.8), равномерно распределяется между тремя шарошками и в крайней точки каждого подшипникового узла определяется как [121]

$$M_D = 3F_{III} R_{III}, \quad (3.59)$$

где

$F_{III}$  - сила, поворачивающая шарошку вокруг оси вращения ШД, Н;

$R_{III}$  - расстояние от оси вращения ШД до крайней точки подшипникового узла, м.

Это расстояние определяется исходя из геометрических размеров ШД и шарошки (рисунок 3.9)

$$R_{III} = (l - k) \sin \beta, \quad (3.60)$$

где

$l$  - расстояние от торца до вершины шарошки, мм;

$\beta$  - угол наклона оси вращения шарошки к оси ШД, град.;

$k$  - величина выступания вершины шарошки за пределы оси вращения ШД, мм.

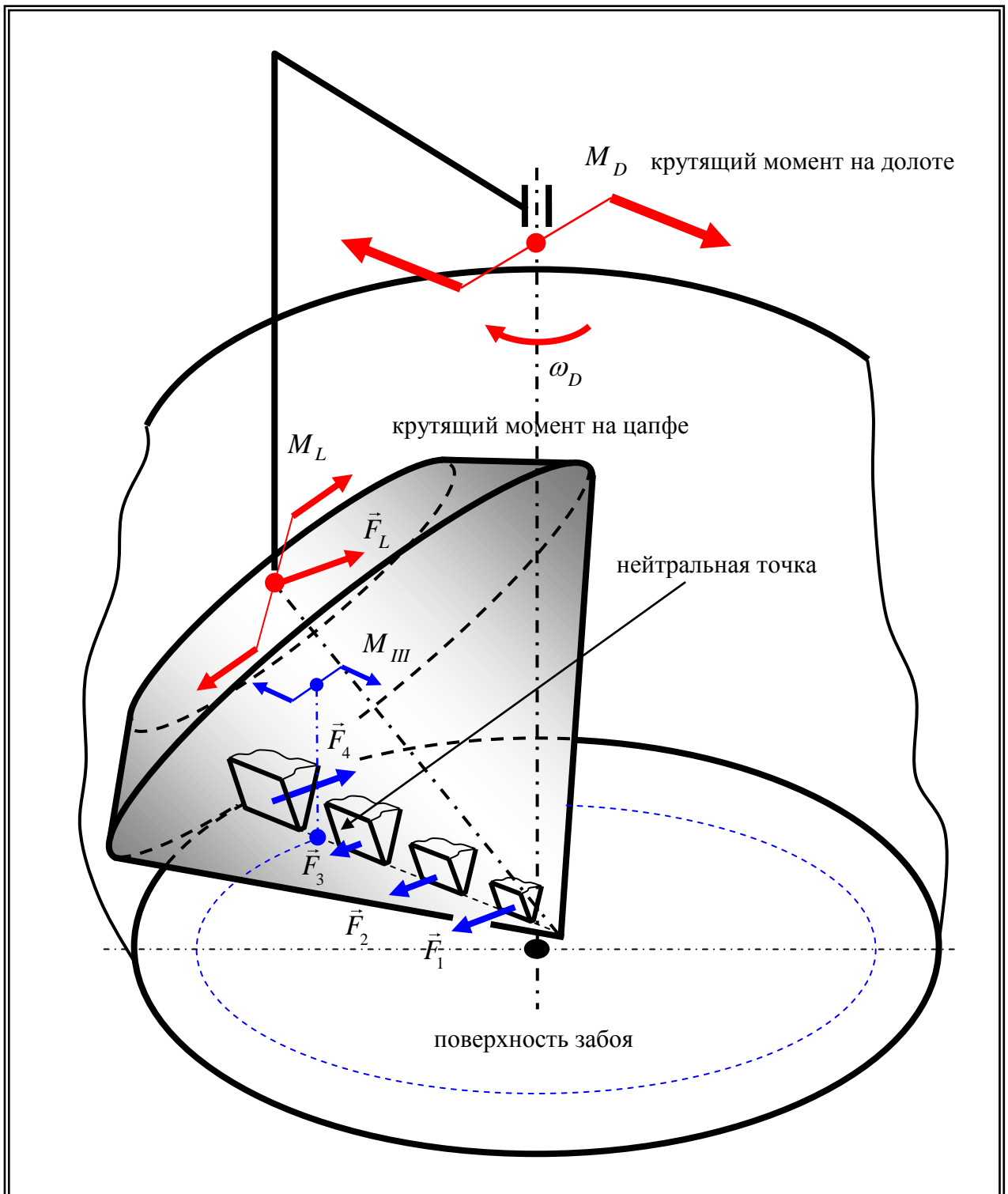


Рисунок 3.8 - Распределение крутящего момента на ШД

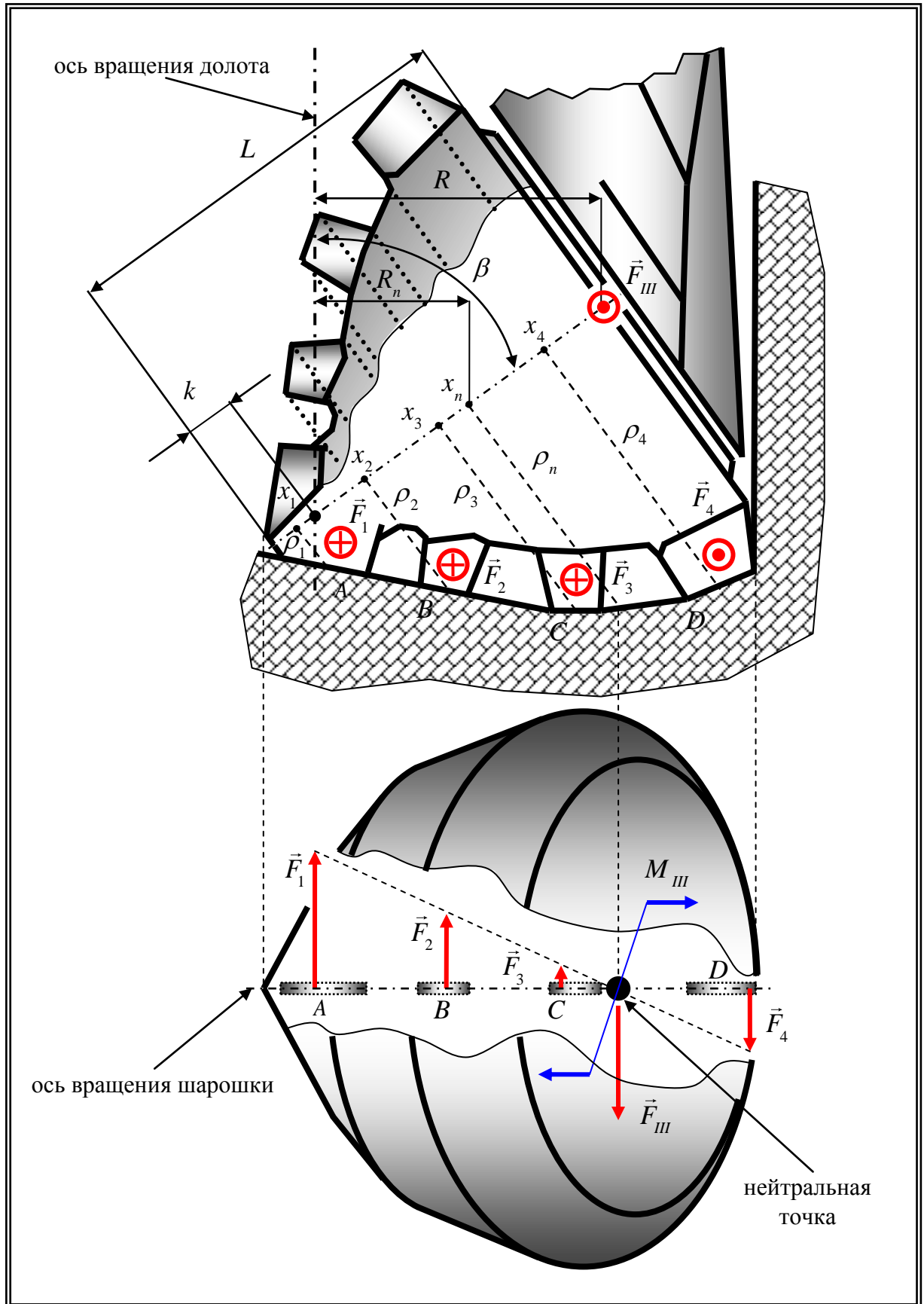


Рисунок 3.9 - Распределение крутящего момента по зубчатым венцам вооружения шарошки ШД



Тогда крутящий момент, возникающий на шарошке в результате проскальзывания зубьев ее вооружения по забою вокруг нейтральной точки, будет определяться как

$$M_{III} = F_{III} (R_{III} - R_n), \quad (3.61)$$

где  $R_n$  - расстояние от оси ШД до точки пересечения оси вращения шарошки с линией, расположенной перпендикулярно к ней и при этом проходящей через нейтральную точку, расположенную на образующей шарошки, находящейся в соприкосновении с забоем, мм.

$$R_n = (x_n - k) \sin \beta, \quad (3.62)$$

где  $x_n$  - расстояние от вершины шарошки, вдоль оси ее вращения до точки пересечения оси вращения шарошки с линией, расположенной перпендикулярно к ней и при этом проходящей через нейтральную точку, расположенную на образующей шарошки, находящейся в соприкосновении с забоем, мм.

В итоге крутящий момент, возникающий на шарошке в результате проскальзывания ее зубчатого вооружения по поверхности забоя вокруг нейтральной точки, запишется как

$$M_{III} = F_{III} (L - k - x_n + k) \sin \beta; \quad (3.63)$$

$$M_{III} = F_{III} (L - x_n) \sin \beta; \quad (3.64)$$

$$M_{III} = M_D \frac{(L - x_n)}{3(L - k)}. \quad (3.65)$$

Тогда силы воздействия зубьев вооружения шарошек на породу, вследствие действия крутящего момента на ШД, можно определить как

$$F_4 = M_D \frac{(L - x_n)}{3(L - k)} [(x_4 - x_n) \sin \beta + \rho_4 \cos \beta]; \quad (3.66)$$

$$F_3 = M_D \frac{(L - x_n)}{3(L - k)} [(x_3 - x_n) \sin \beta - \rho_3 \cos \beta]; \quad (3.67)$$

$$F_2 = M_D \frac{(L - x_n)}{3(L - k)} [(x_2 - x_n) \sin \beta - \rho_2 \cos \beta]; \quad (3.68)$$

$$F_1 = M_D \frac{(L - x_n)}{3(L - k)} [(x_1 - x_n) \sin \beta - \rho_1 \cos \beta]. \quad (3.69)$$

где  $x_{1-4}$  - расстояние от вершины шарошки вдоль оси ее вращения до точки пересечения оси вращения шарошки с линией, расположенной перпендикулярно к ней и при этом проходящей через середину площадки притупления соответствующего зуба вооружения ШБИ, мм;

$\rho_{1-4}$  - кратчайшее расстояние от оси вращения шарошки до середины площадки притупления соответствующего зуба вооружения ШБИ, мм.

Подробнее рассмотрим влияние сил сопротивления породы, а следовательно и сил, необходимых для ее гарантированного разрушения, на кинематические характеристики шарошек.

На (рисунок 3.10.1) представлена схема взаимодействия с поверхностью забоя шарошек, не смещенных в плане относительно оси вращения ШД (т. е. проскальзывание происходит только вследствие отличия геометрии шарошки от формы конуса «чистого качения»), оснащенных тремя зубчатыми венцами с одинаковыми по своим геометрическим параметрам зубьями.

При перекачивании шарошек вокруг оси ШД вершинные венцы 1 каждой шарошки будут пробуксовывать, в то время как периферийные 3 подтормаживать. В связи с этим средний венец 2 будет ведущим, а следовательно, станет определять скорость вращения шарошки. Силы сопротивления породы, препятствующие проскальзыванию зубьев 1-го и 3-го венцов, будут примерно одинаковыми, поэтому нейтральная точка будет располагаться приблизительно в середине площадки притупления зуба, взаимодействующего с забоем, среднего венца [121].

При этом крутящий момент на ШД, требуемый для разрушения породы за счет проскальзывания зубчатого вооружения, будет достаточно равномерно распределен между всеми тремя шарошками:

$$M_D = M_{III}^1 + M_{III}^2 + M_{III}^3, \quad (3.70)$$

при примерном равенстве

$$M_{III}^1 \approx M_{III}^2 \approx M_{III}^3. \quad (3.71)$$

На (рисунок 3.10.2) представлена еще одна схема воздействия на поверхность забоя зубчатого вооружения ШД, аналогичного первому, но с другой ориентацией зубьев, заключающейся в том, что две шарошки оснащены зубьями вооружения на первом (вторая) и третьем (первая) венцах, повернутыми под девяносто градусов к осям шарошек. В данном случае, при перекачивании шарошек вокруг оси ШД, вершинные венцы 1 каждой шарошки также будут пробуксовывать, в то время как периферийные 3 - подтормаживать, однако произойдет существенное изменение величин этих проскальзываний. Это связано с тем, что при указанной геометрии зубчатого вооружения шарошек силы сопротивления породы, препятствующие проскальзыванию зубьев 1-го и 3-го венцов, не будут одинаковыми, а следовательно, согласно принципу равенства работ, произойдет самостоятельное уравнивание шарошки путем смещения нейтральной точки в сторону венца, зубья которого воспринимают большие сопротивления проскальзыванию.

$$M_{III}^3 > M_{III}^1; M_{III}^3 > M_{III}^2; M_{III}^1 \neq M_{III}^2. \quad (3.72)$$

При этом ведущим, соответственно может стать либо первый, либо третий венец вооружения шарошек. Это неминуемо приведет не только к существенной разнице в скоростях вращения

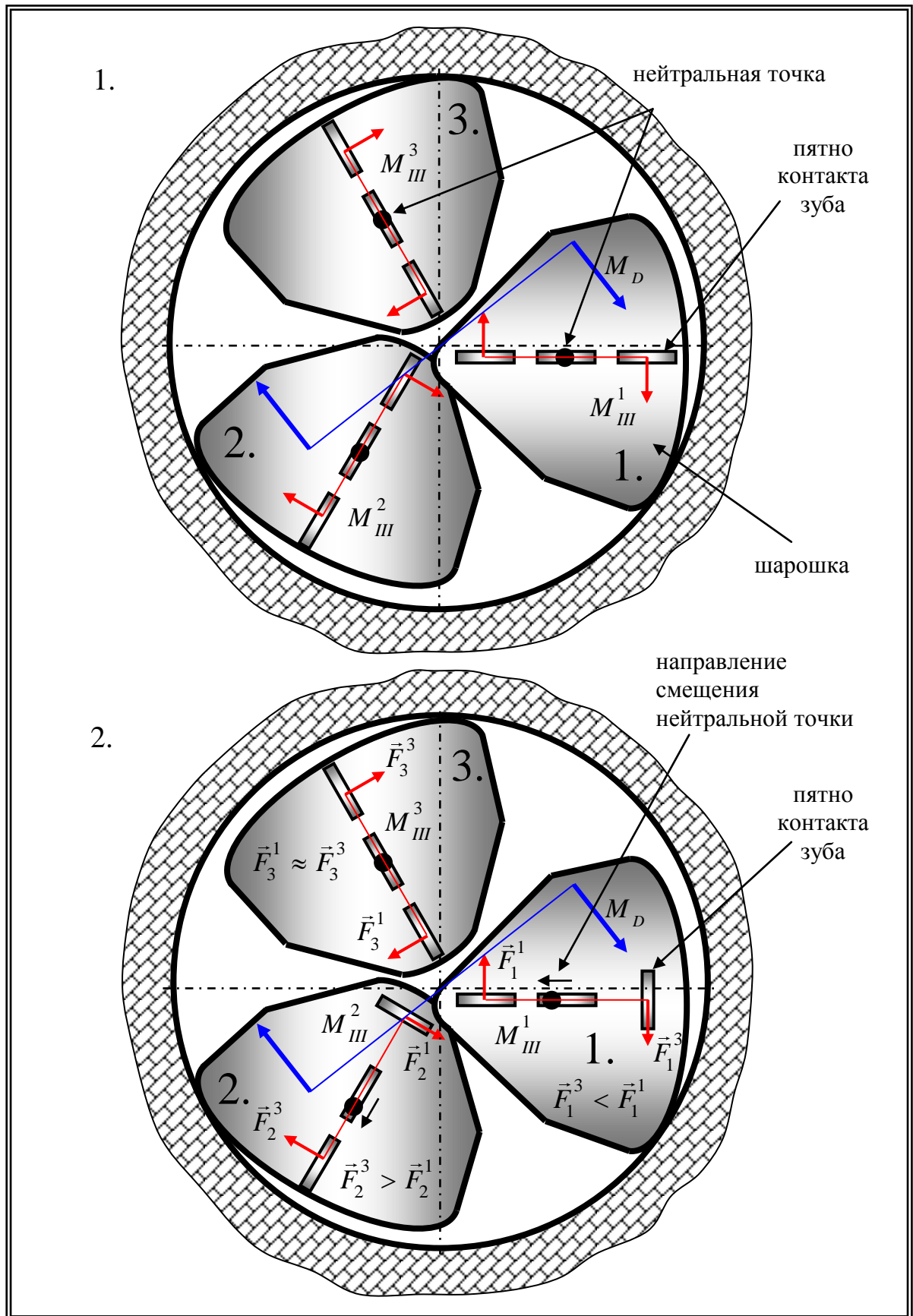


Рисунок 3.10 - Схема влияния ориентации зубьев на распределение крутящего момента и положения нейтральной точки на каждой из шарошек ШД

всех трех шарошек, но и будет способствовать неравномерному повышенному износу зубчатого вооружения ШБИ, а также отклонению инструмента от требуемого направления бурения.

Это также объясняет причину того, что в начале работы ШБИ, в местах, где большая удельная работа затрачивается на износ, происходит быстрое изнашивание зубчатого вооружения, а там где превалирует удельная работа разрушения, осуществляется более интенсивное разрушение породы забоя. В процессе дальнейшей работы ШБИ происходит постоянное перераспределение удельного давления между неэффективными и малоизнашивающимися венцами шарошки и венцами, где удельная работа износа или разрушения имеет большую величину.

В результате, за счет изменения (перераспределения) удельного давления при неизменной осевой нагрузке на ШД будет происходить выравнивание удельной энергии между всеми венцами шарошек. Это явление, хотя и не увеличивает механическую скорость бурения, но способствует прогрессирующему износу как вооружения шарошек, так и их опор.

Следовательно, конструкции ШД, предназначенные для бурения мягких и средних пород, работающих с проскальзыванием зубчатого вооружения по забою, помимо общих требований, таких как: самоочищение шарошек; полное перекрытие забоя венцами шарошек; достаточная прочность зубьев и работоспособность опор и т. д., должны обеспечивать для зубьев шарошек такие абсолютные и относительные переносные скорости, а также углы  $\delta_{ki}$ , при которых средняя для каждой из шарошек величина отношения абсолютной и переносной скорости будет наибольшей. Этого можно добиться, используя закон об изменении кинетической энергии применительно к шарошке ШБИ в ее относительном движении. При заданной переносной скорости (скорости вращения ШД) посредством этого закона можно установить аналитическую зависимость между конструктивными параметрами долота и шарошек (положением шарошек, их формой, размещением на них венцов, их размерами и т. д.) и абсолютными и относительными скоростями зубьев вооружения на рабочих участках забоя. Также данная зависимость позволяет определять направления векторов абсолютных скоростей зубьев, находящихся в соприкосновении с поверхностью забоя, для каждого из венцов шарошек и в зависимости от этого рассчитывать углы наклона зубьев на соответствующих венцах, а также корректировать форму основных рабочих поверхностей зубьев вооружения ШБИ.

Проведенные исследования процесса работы ШБИ при бурении мягких и средних пород позволили установить, что его шарошки «перекатываются» по забою со скольжением, поэтому должны оснащаться геометрией зубчатого вооружения, позволяющей обеспечивать зубьям шарошек такие абсолютные и относительные скорости, а также углы между направлениями равнодействующих нормальных сил и осевой нагрузкой на инструмент, при которых среднее значение отношения абсолютной и переносной скоростей для каждой шарошки ШБИ было бы наибольшим. А также установлено, влияние размеров расположения и разнонаправленности

зубьев вооружения на равномерность распределения крутящего момента по всем шарошкам ШБИ.

### **3.4 Исследование отклоняющих и стабилизирующих сил, возникающих в процессе работы косозубого вооружения шарошечного бурового инструмента**

В процессе работы ШБИ практически всегда существует вероятность отклонения инструмента от заданного направления бурения. Как правило, это связано с возникновением, по той или иной причине, отклоняющего усилия на ШБИ. Это обстоятельство также приводит и к увеличению износа опорных узлов ШБИ вследствие воздействия на них дополнительных осевых нагрузок, связанных с разрушением горной породы за счет проскальзывания зубчатого вооружения по поверхности забоя. Все это существенно снижает эффективность работы ШБИ и приводит к повышению стоимости буровых работ.

Как было установлено ранее, при бурении мягких и средних пород шарошечными долотами с КЗВ появляются дополнительные осевые силы, возникающие вследствие проскальзывания КЗВ по забою (рисунок 2.2) и (рисунок 2.6).

С целью минимизации воздействия отклоняющих сил на ШБИ и повышения эффективности его работы, за счет оптимизации удаления шлама из зоны работы зубьев вооружения шарошек и обеспечения проводки скважины строго в требуемом направлении, а также увеличения ресурса опорных узлов, были предложены и изучены две основные конструктивные схемы геометрии КЗВ: однонаправленная и разнонаправленная [99, 121].

По первому варианту, когда все зубья в рамках одной шарошки направлены в одну сторону, добиться повышения эффективности работы ШД путем обеспечения проходки скважины по заданному направлению можно только в том случае, если каждая шарошка будет оснащена КЗВ, ориентированным таким образом, чтобы осевая нагрузка на опорный узел, возникающая вследствие воздействия сил сопротивления разрушению породы на КЗВ одного из венцов шарошки, полностью компенсировалась одинаковой по величине и прямо противоположной по знаку осевой нагрузкой, возникающей при одновременной работе оставшихся венцов этой шарошки [131].

Таким образом, суммарные осевые усилия на всех шарошках ШБИ  $N_A$ ,  $N_B$  и  $N_C$  от соответствующих сил сопротивления разрушению горной породы, вызываемых усилиями по ее разрушению  $F_A$ ,  $F_B$  и  $F_C$  разноориентированного КЗВ (рисунок 3.11), проскальзывающего по поверхности забоя, должны соотноситься между собой следующим образом:

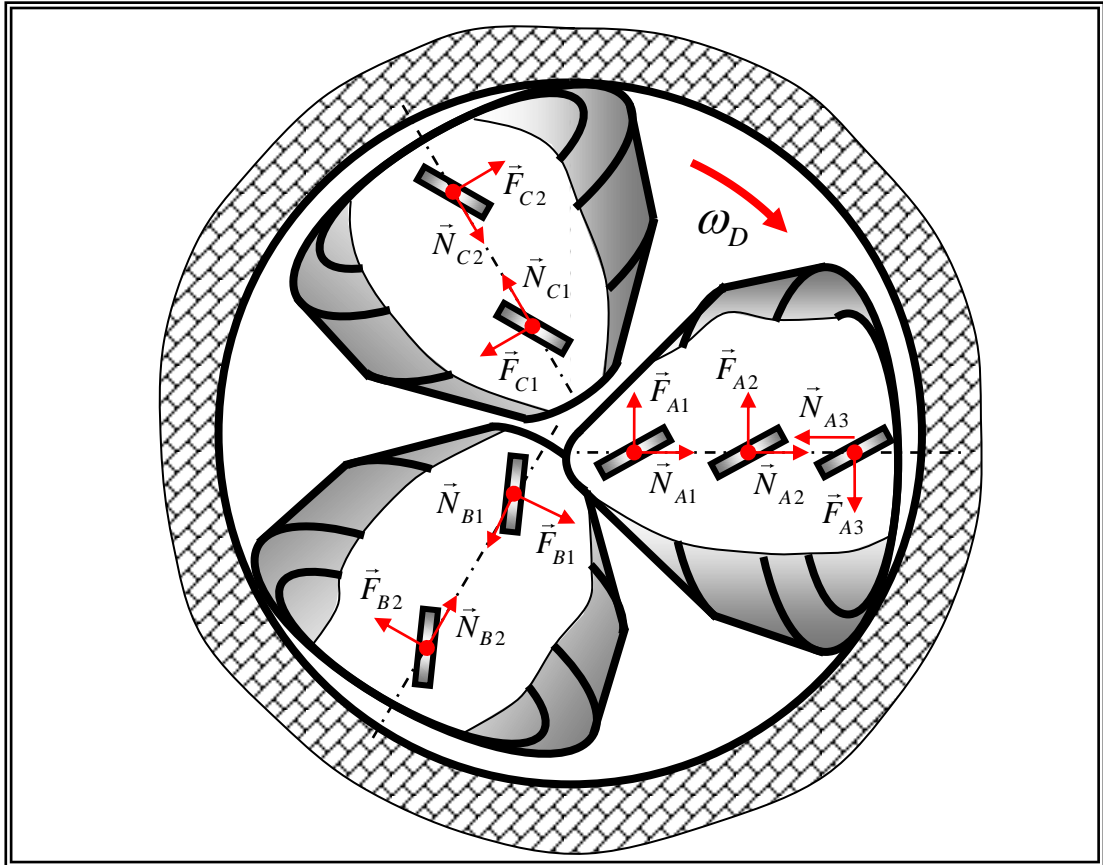


Рисунок 3.11 - Схема однонаправленной геометрии КЗВ

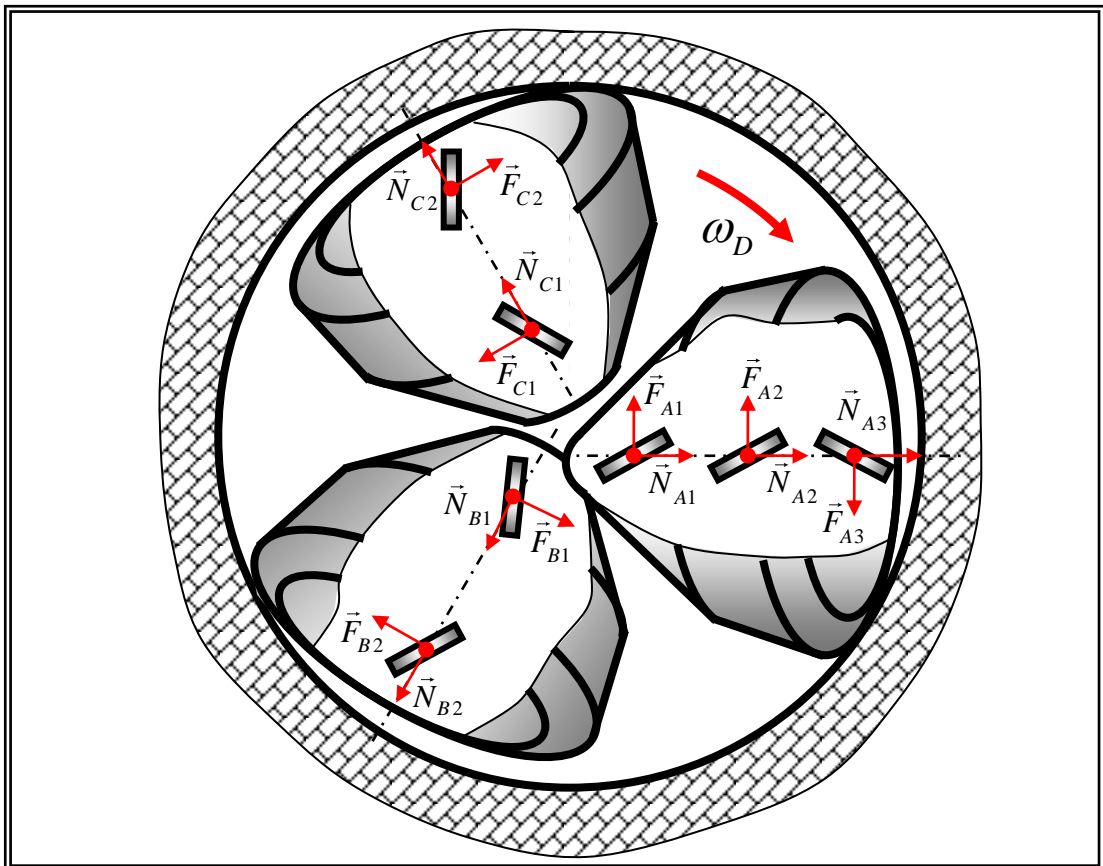


Рисунок 3.12 - Схема разнонаправленной геометрии КЗВ

$$\begin{cases} N_A = N_{A1} + N_{A2} + N_{A3} = 0; \\ N_B = N_{B1} + N_{B2} = 0; \\ N_C = N_{C1} + N_{C2} = 0; \end{cases}, \quad (3.73)$$

где  $N_{A1}$  - осевая нагрузка на опорный узел  $A$  долота, возникающая вследствие усилия разрушения породы  $F_{A1}$  зубьев первого венца шарошки  $A$  с наклонным вооружением при его проскальзывании по забою;

$N_{A2}$  - осевая нагрузка на опорный узел  $A$  долота, возникающая вследствие усилия разрушения породы  $F_{A2}$  зубьев второго венца шарошки  $A$  с наклонным вооружением при его проскальзывании по забою;

$N_{A3}$  - осевая нагрузка на опорный узел  $A$  долота, возникающая вследствие усилия разрушения породы  $F_{A3}$  зубьев третьего венца шарошки  $A$  с наклонным вооружением при его проскальзывании по забою;

$N_{B1}$  - осевая нагрузка на опорный узел  $B$  долота, возникающая вследствие усилия разрушения породы  $F_{B1}$  зубьев первого венца шарошки  $B$  с наклонным вооружением при его проскальзывании по забою;

$N_{B2}$  - осевая нагрузка на опорный узел  $B$  долота, возникающая вследствие усилия разрушения породы  $F_{B2}$  зубьев второго венца шарошки  $B$  с наклонным вооружением при его проскальзывании по забою;

$N_{C1}$  - осевая нагрузка на опорный узел  $C$  долота, возникающая вследствие усилия разрушения породы  $F_{C1}$  зубьев первого венца шарошки  $C$  с наклонным вооружением при его проскальзывании по забою;

$N_{C2}$  - осевая нагрузка на опорный узел  $C$  долота, возникающая вследствие усилия разрушения породы  $F_{C2}$  зубьев второго венца шарошки  $C$  с наклонным вооружением при его проскальзывании по забою.

Обеспечение данного условия может быть достигнуто за счет использования множества конструкторских решений, например, подбором необходимого количества зубьев на венцах с КЗВ; использованием различных сочетаний разноориентированного КЗВ как по венцам отдельно взятой шарошки, так и в их совокупности в рамках ШБИ; варьированием углов наклона и ширины зубьев, каждого отдельного венца каждой шарошки и т. д. [63].

Такая геометрии зубчатого вооружения шарошек дает возможность обеспечивать взаимное уравнивание усилий, действующих вдоль оси вращения каждой шарошки ШБИ, возникающих вследствие разрушения горной породы зубьями различных ее венцов, проскаль-

зывающих по поверхности забоя в противоположных направлениях. Это же способствует увеличению долговечности опорных узлов ШБИ, а также сохранению заданного направления бурения, в течение всего времени работы инструмента. Данная схема однонаправленного КЗВ может применяться в ШБИ с различным числом шарошек [66, 123].

По второму варианту, когда зубья различных венцов в рамках одной шарошки могут быть одновременно направлены как в одну, так и в другую сторону (рисунок 3.12), добиться повышения эффективности работы ШБИ за счет обеспечения проводки скважины по требуемому направлению можно только в том случае, если каждая шарошка будет оснащена КЗВ, ориентированным таким образом, чтобы все суммарные осевые нагрузки, возникающие вследствие воздействия сил сопротивления разрушению породы при проскальзывании КЗВ по забою, действующие на каждый опорный узел, были одинаковыми по величине и направлению (к центру или от центра ШБИ). Величина угла наклона зубьев определяется главным образом физико-механическими свойствами разбуриваемых пород и применяемыми способами и режимами бурения. Чем «мягче» породы, тем большим должен быть угол наклона зубьев с точки зрения эффективности разрушения породы и ее эвакуации из зоны бурения.

При этом наличие зубьев с наклонным расположением их режущей кромки под углом к оси шарошки ведет к возникновению дополнительных осевых нагрузок, действующих на опорные узлы ШД, приводящие не только к дополнительному нагружению его опорных узлов, но и стремящихся увести ШД от заданного направления бурения. Для устранения этого фактора при проектировании вооружения ШБИ необходимо соблюсти условие, что суммарные составляющие осевой нагрузки  $N_{A,B,C}$  на каждый опорный узел ШД, возникающие вследствие усилия разрушения породы  $F_{A,B,C}$  венцами шарошек с наклонным вооружением при его проскальзывании по забою – одинаковы по величине и совпадают по направлению, т. е. на всех шарошках они одновременно направлены либо от центра вращения долота, либо к его центру. Для трехшарошечного долота это условие должно удовлетворять следующему равенству:  $N_A = N_B = N_C$ ;

где  $N_A = N_{A1} + N_{A2} + N_{A3}$ ;  $N_B = N_{B1} + N_{B2}$ ;  $N_C = N_{C1} + N_{C2}$  (3.74).

Данная схема разноориентированного КЗВ может применяться в ШБИ с различным числом шарошек [64].

Так же, как и в первом случае, обеспечение данного условия может быть достигнуто за счет использования множества конструкторских решений: подбором необходимого шага и количества зубьев на венцах с КЗВ; использованием различных сочетаний разноориентированного КЗВ как по венцам отдельно взятой шарошки, так и в их совокупности в рамках ШБИ; варьированием углов наклона и ширины зубьев, каждого отдельного венца каждой шарошки и т. д.



Таким образом, проведенное исследование отклоняющих и стабилизирующих сил, возникающих в процессе работы КЗВ ШБИ, позволило выявить некоторые особенности работы данного вида вооружения в отличие от классического ПЗВ. На этой основе были разработаны технические решения, дающие возможность в значительной степени компенсировать воздействия дополнительных отклоняющих усилий, возникающих при работе КЗВ, которые позволяют обеспечить хорошую управляемость инструмента при проводке скважин по требуемому направлению, а также повысить ресурс работы опорных узлов ШБИ.

### **3.5 Исследование факторов, влияющих на эффективность разрушения средних и твердых пород вооружением шарошечного бурового инструмента**

Повышение основных показателей процесса бурения, таких как механическая скорость и проходка, как правило, напрямую зависит от эффективности разрушения горной породы зубчатым вооружением ШБИ.

Как уже отмечалось ранее, в зависимости от свойств горных пород ШБИ по кинематическим характеристикам можно условно разделить на две группы, обусловленные характером взаимодействия зубьев их вооружения с породой. Это ШД ударно-режущего и ударно-дробящего действия.

Особенностью ШД ударно-дробящего действия, предназначенных для бурения средних и твердых пород, является минимальное проскальзывание зубьев при перекатывании шарошек по забою, связанное преимущественно с многоконусностью шарошек, наличием и неравномерностью зазоров в опорных узлах, трением в подшипниках, а также полное отсутствие фрезерующего действия по стенке скважины зубьями периферийных калибрующих венцов. Как правило, оси шарошек этих ШД пересекаются с осью вращения долота либо имеют незначительный эксцентриситет [50].

Разрушение породы забоя осуществляется в основном за счет ударного и силового воздействия вершин зубьев вооружения на породу забоя.

Одним из путей повышения эффективности разрушения средних и твердых пород является использование взаимовлияния полей напряжений, возникающих при одновременном контакте с забоем нескольких зубьев вооружения [44, 91, 168].

Как известно, взаимовлияние полей напряжений может возникать при различных видах воздействия на породу: механическом, тепловом, термохимическом и гидродинамическом. Эффект от взаимовлияния полей напряжений в значительной степени зависит от расстояния между точками воздействия, величинами нагрузок и площадью контактов.

При значительной удаленности точек воздействия и незначительных контактных нагрузках взаимовлияние полей напряжения практически не сказывается на интенсивности разрушения забоя. Для повышения эффективности разрушения породы зубьями вооружения шарошек необходимо, чтобы расстояние между точками вдавливания соседних зубьев вооружения и контактные нагрузки на забой, возникающие вследствие их воздействия, создавали суммарную величину напряжений в породе забоя, сопоставимую с ее прочностью.

Вооружение ШБИ представляет собой многовенцовые и многозубчатые конструкции сложной геометрии. В процессе работы ШБИ практически всегда гарантирована возможность одновременного взаимодействия с забоем сразу нескольких зубьев вооружения каждой из шарошек [169]. Поэтому изучение особенностей разрушения горных пород при одновременном контакте нескольких зубчатых элементов (инденторов) имеет большое практическое значение.

На (рисунок 3,14) представлены расчетные схемы одновременного и последовательного вдавливания двух инденторов в породу забоя и картины распространения в ней линий равных интенсивностей касательных напряжений  $\sigma$  [44].

Известно, что при одновременном вдавливании двух инденторов, расположенных на определенном расстоянии друг от друга, в горной породе может быть достигнуто предельное состояние, которое напрямую зависит от интенсивности касательных напряжений в породе, возникающих как между инденторами, так и под ними [44, 91]. В результате этого эффекта происходит объединение лунок выкола двух соседних инденторов и образуется общая лунка (рисунок 3.14.1) значительно большего размера (примерно в 2 раза), чем при последовательном вдавливании (рисунок 3.14.2). Поэтому расстояние между зубьями вооружения, обеспечивающее образование общей лунки выкола, с точки зрения разрушающей способности инструмента является наиболее эффективным.

Исследование напряженного состояния, возникающего в породе забоя при последовательном вдавливании инденторов показали, что предельное состояние в породе наступает вначале под первым индентором а затем под вторым, однако при этом происходит лишь раздельное образование соответствующих лунок, и не происходит их объединение (рисунок 3.15.2).

Таким образом при одновременном воздействии на забой двух зубьев вооружения ШБИ существует такое оптимальное расстояние между их вершинами, при котором будет достигаться максимально возможный эффект от сложения волн напряжений, создаваемых ими в разбуриваемой породе.

Помимо этого анализ результатов исследований полей напряжений, полученных при последовательном и одновременном динамическом вдавливании двух инденторов, показал, что при последовательном вдавливании, несмотря на то, что после первого удара напряженная зона частично перекрывается вновь созданным полем напряжений от второго удара, трещины между

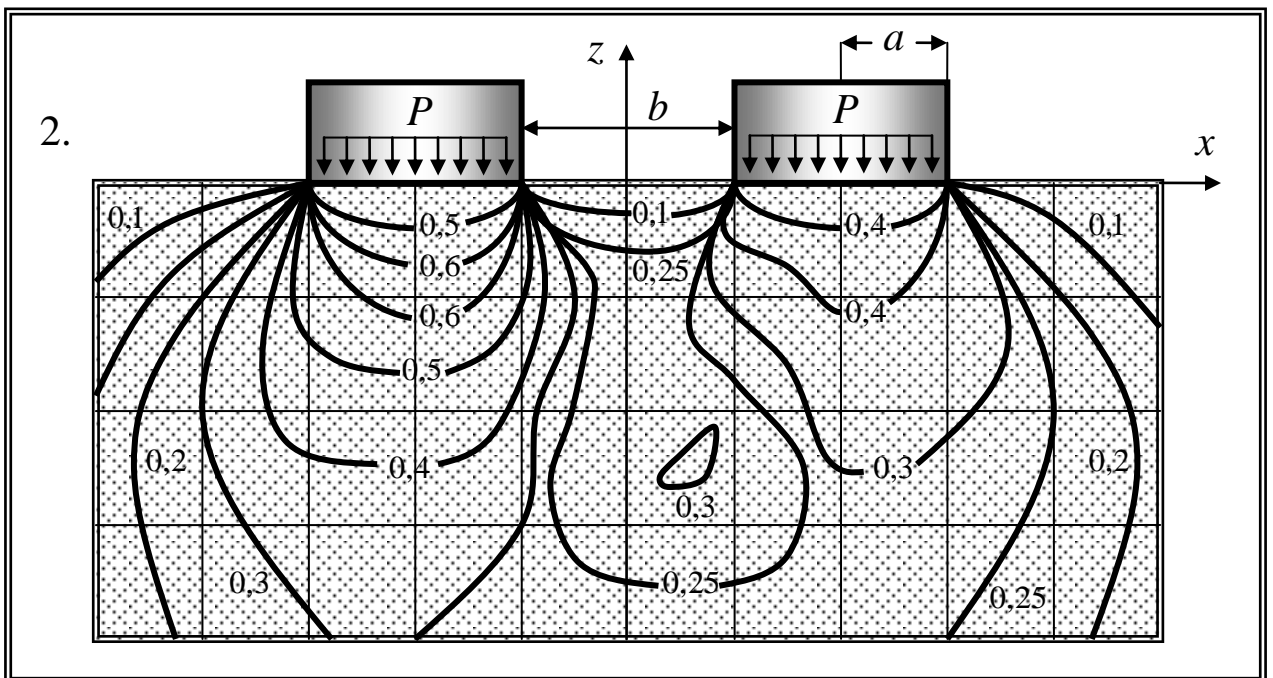
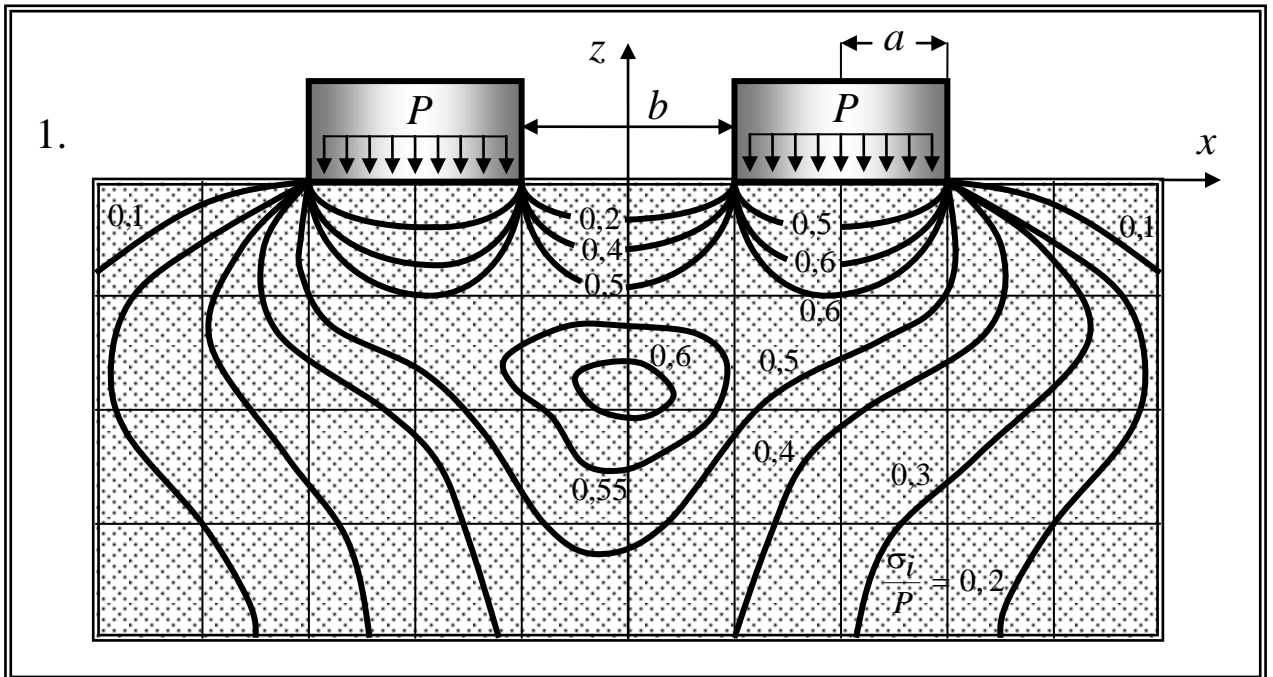


Рисунок 3.14 - Распределение напряжений в породе забоя в относительных координатах

$$\frac{\sigma_i}{P} = f\left(\frac{x}{a}; \frac{z}{a}\right) \text{ при вдавливании двух инденторов}$$

1 - одновременном; 2 - последовательном

инденторами не образуется. Такая трещина появляется лишь при одновременном вдавливании двух инденторов, причем удаленных на то же расстояние  $b$  и при тех же условиях нагружения (рисунок 3.14).

Еще одной особенностью одновременного вдавливания является уменьшение энергоемкости разрушения породы с увеличением числа одновременно воздействующих на забой инденторов (рисунок 3.15). Представленная зависимость демонстрирует, что нагрузка на один индентор существенно уменьшается при увеличении количества инденторов. Это свидетельствует о том, что при одновременном контакте двух смежных зубьев вооружения, расположенных на одном венце, осевое усилие не должно увеличиваться вдвое, для того чтобы сохранить достигнутую интенсивность разрушения породы.

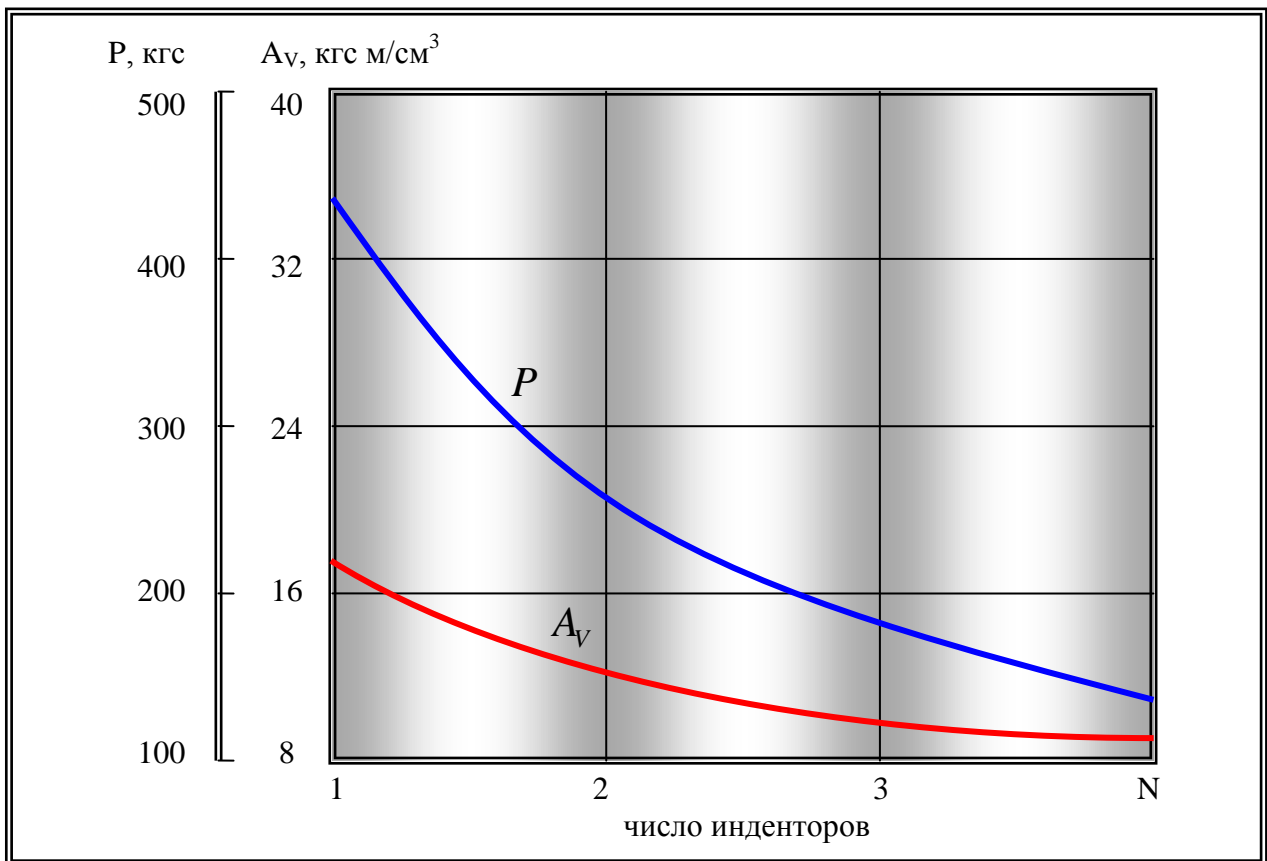


Рисунок 3.15 - Зависимость энергоемкости разрушения  $A_v$  и усилия в момент разрушения  $P$  от числа одновременно вдавливаемых инденторов

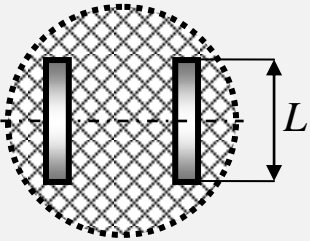
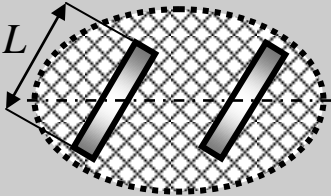
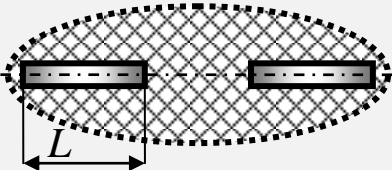
Большой интерес представляют исследования влияния ориентации клиновидных инденторов на эффективность разрушения горных пород при одновременном динамическом вдавливании [44, 91], результаты которых приведены в (таблице 3.1).

Из таблицы видно, что объем лунок выкола при параллельном расположении инденторов (строка 1) почти вдвое больше, а энергоемкость разрушения породы вдвое ниже, чем при рас-

положении инденторов вдоль одной линии большими сторонами  $L$  (строка 3). Формы общих лунок выкола также зависят от ориентации инденторов.

Поэтому, можно предположить, что при расположении зубьев вооружения большими сторонами площадок притупления  $L$  вдоль образующей шарошки эффективность разрушения породы забоя путем одновременного вдавливания будет значительно ниже, чем при расположении их перпендикулярно к оси вращения шарошки.

Таблица 3.1 - Влияние ориентации клиновидных инденторов на эффективность разрушения горных пород при одновременном динамическом вдавливании

	Схема расположения инденторов и формы лунок выкола	Объем разрушенной породы, см <sup>3</sup>	Энергоемкость разрушения, кгс.м/ см <sup>3</sup>
1		0,296	10,3
2		0,196	15,3
3		0,142	20,8

Эти результаты имеют важное практическое значение при создании более новой геометрии вооружения ШБИ, позволяющей существенно повысить основные показатели бурения без значительного увеличения, необходимых для успешного проведения процесса бурения, энергетических затрат.

Так, при увеличении числа зубьев вооружения шарошки, одновременно находящихся в соприкосновении с породой, с сохранением постоянной суммарной площади их контакта с забоем и обеспечении условий межзубного силового взаимодействия, описанного ранее, можно добиться большей эффективности разрушения средних и твердых пород при неизменной нагрузке на долото. Одним из путей практической реализации в геометрии вооружения ШБИ эффекта сложения волн напряжений может служить использование дисковых венцов на основных конусах шарошек и надрезание зубьев периферийных венцов по длине (рисунок 3.16).

К тому же это конструктивное решение позволяет уменьшить суммарную площадь контакта зубьев, одновременно находящихся в соприкосновении с забоем, и тем самым увеличить их контактное давление на горную породу. При значительной осевой нагрузке на инструмент существует вероятность разрушения забойной рейки взаимодействующими зубьями одного венца за счет образования трещины, соединяющей основания ядер разрушения, создаваемых в местах контакта соседних зубьев вооружения с забоем.

Образование забойной рейки является достаточно распространенным явлением при бурении средних и твердых пород ШБИ. Ее формирование на поверхности забоя в процессе работы ШБИ оказывает крайне отрицательное влияние на процесс разрушения породы забоя и, как правило, приводит к существенному снижению основных показателей бурения, таких как: проходка на инструмент и механическая скорость бурения.

Одной из наиболее распространенных причин рейкообразования является резкий переход инструмента из зоны бурения твердых хрупких пород в пропласток, образованный более пластичными породами средней категории твердости. В этом случае шарошечные долота, оснащенные дисковыми венцами и успешно работающие при бурении твердых и хрупких пород (рисунок 3.16), становятся малоэффективными, так как незначительные проскальзывания вооружения, связанные с многоконусностью шарошек, не могут способствовать процессу более эффективного разрушения средних пород ввиду расположения больших рабочих граней зубьев вооружения перпендикулярно к осям вращения шарошек и параллельно к направлению их проскальзывания по забою.

Наиболее перспективным и эффективным способом борьбы с рейкообразованием является оснащение шарошек бурового инструмента разнонаправленным косозубым вооружением (рисунок 3.17). Например, 1-я шарошка оснащена косозубым вооружением с правым углом подъема винтовой линии  $\varphi_1^{right}$ , 2-я шарошка оснащена косозубым вооружением с левым углом наклона  $\varphi_2^{left}$ , а 3-я шарошка также имеет косозубое вооружение с левым углом подъема винтовой линии  $\varphi_3^{left}$ , но отличной от  $\varphi_2^{left}$  величины [119, 145]. В этом случае при попадании разнонаправленных наклонных зубьев след в след будет обеспечиваться полное разбивание реечной поверхности, образующейся в результате воздействия на забой вооружения каждой из предыдущих шарошек.

На (рисунок 3.17) показаны возможные варианты наложения попаданий зубьев соседних шарошек след в след: 1 X - образно в средней части площадок притупления зубьев; 2 V - образно с точкой наложения в районе периферийной части венца; 3 V - образно с точкой наложения в районе вершинной части венца.

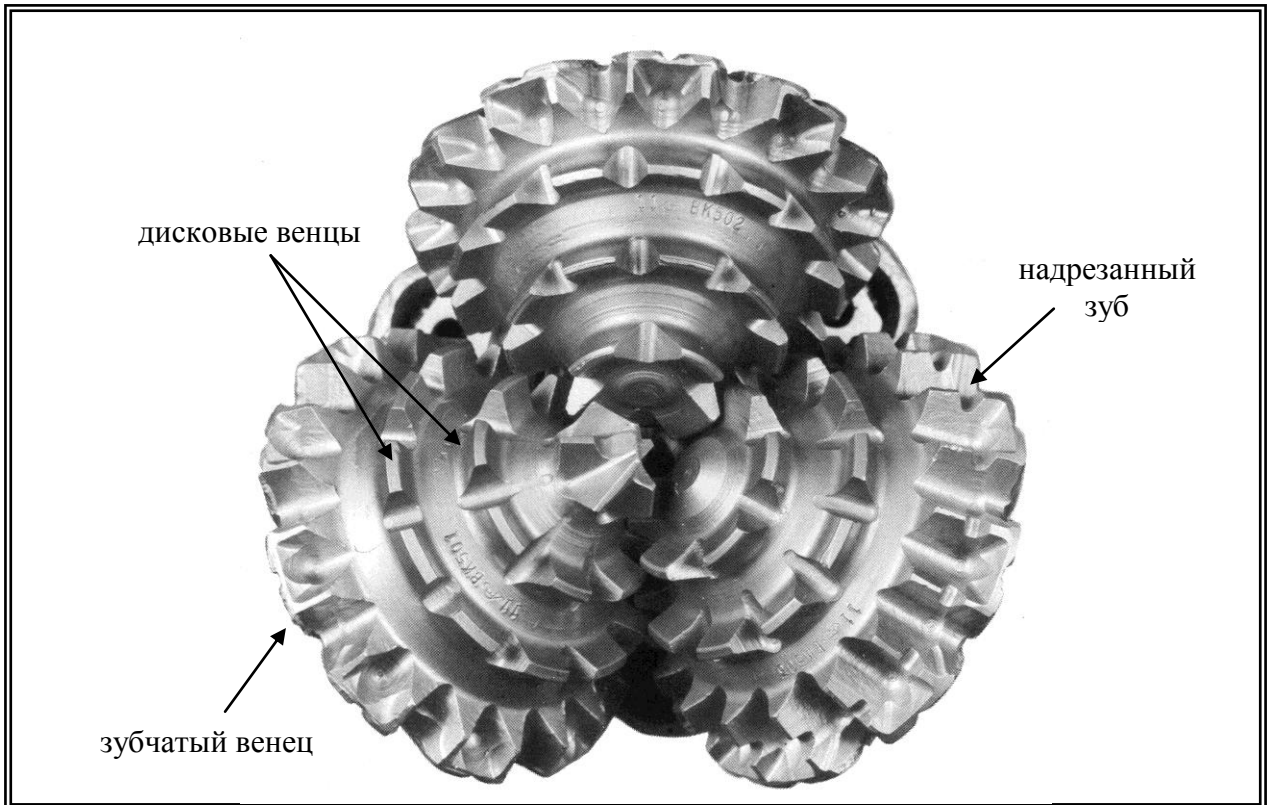


Рисунок 3.16 - Долото с комбинированным зубчатым вооружением

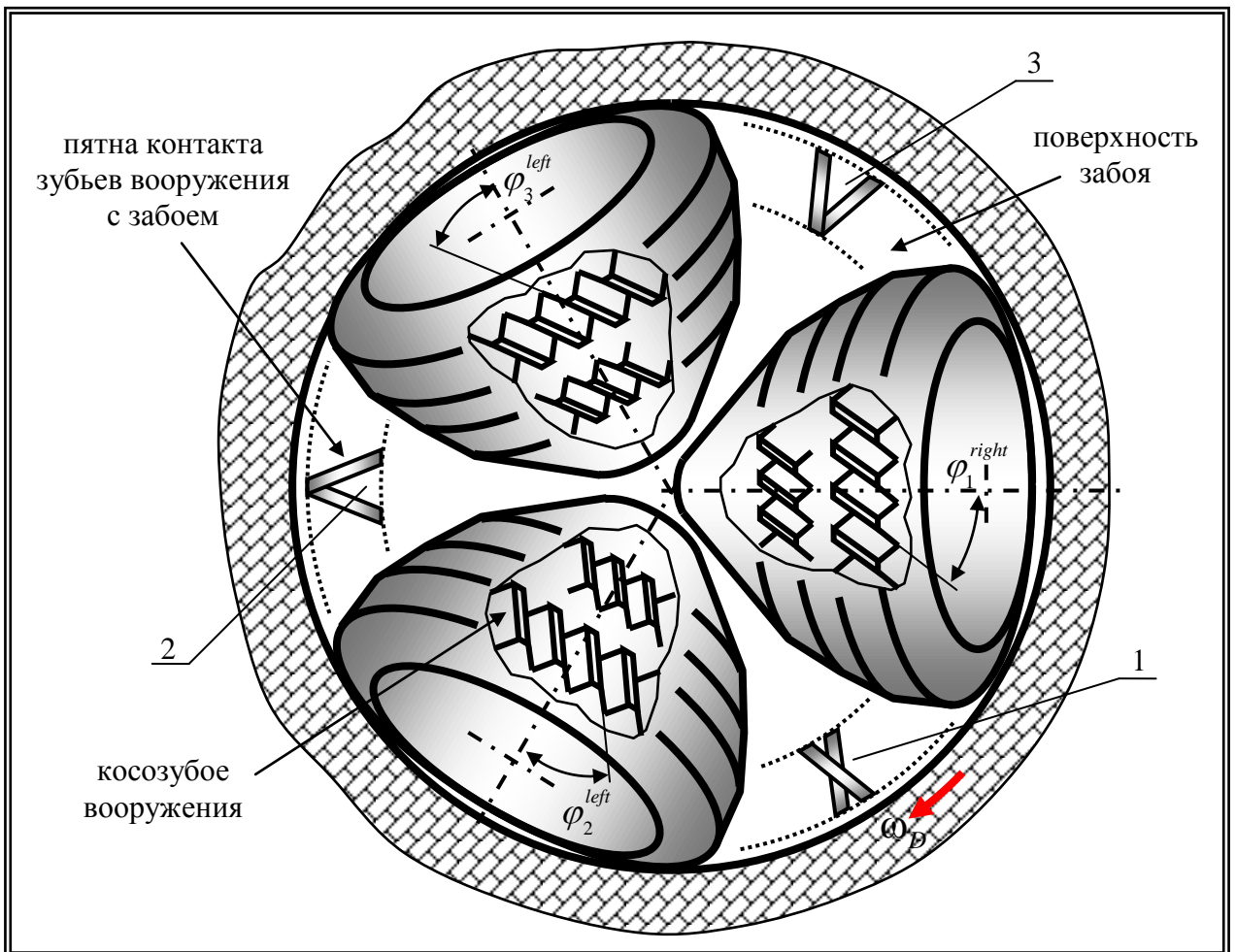


Рисунок 3.17 - Схема шарошечного долота с разнонаправленным КЗВ

Аналогично будут меняться и геометрии распределения полей напряжений, возникающих под воздействием разнонаправленного косозубого вооружения. При этом необходимо обеспечивать сохранение усредненной величины удельного давления наклонных зубьев на поверхность забоя, аналогичную прямозубому, за счет соответствующего уменьшения длин винтовых площадок притупления и поперечных надрезов вершин зубьев.

Помимо этого, с точки зрения прочностных показателей использование косозубого вооружения позволяет уменьшить угол заострения зубчатых элементов в сравнении с обычным прямозубым вооружением шарошек, так как винтовой профиль зуба существенно снижает действующую на него изгибающую нагрузку, равную лишь величине нормальной составляющей общего усилия ответной реакции забоя.

В.М. Рубарх установил [90], что при уменьшении угла заострения зубьев и увеличении ширины площадок притупления зубчатых элементов шарошки значительно снижаются нагрузки, необходимые для разрушения ответной речной поверхности забоя, осуществляемой за счет различных специальных конструктивных элементов вооружения.

Однако существующие на сегодняшний день конструкции, такие как: «раздавливатели» рейки, изменяющиеся в рамках одного венца размер и шаг зубьев вооружения и так далее, не обеспечивают качественного выравнивания поверхности забоя и ввиду их малочисленности и соответственно загруженности склонны к быстрому изнашиванию.

В связи с этим использование разнонаправленного косозубого вооружения с уменьшенным углом заострения зубьев позволит не только снизить энергетические затраты, необходимые для разрушения породы забоя, но и обеспечить равномерный износ всех зубьев вооружения на протяжении полного цикла работы инструмента.

Таким образом, проведенное исследование факторов, влияющих на эффективность разрушения средних и твердых пород ШБИ, позволило установить, что при одновременном воздействии на забой двух зубьев вооружения ШБИ существует такое оптимальное расстояние между их вершинами, при котором будет достигаться максимально возможный эффект от сложения волн напряжений, создаваемых ими в разбуриваемой породе, а также что при расположении зубьев вооружения большими сторонами их площадок притупления вдоль образующей шарошки, эффективность разрушения породы забоя путем одновременного вдавливания будет значительно ниже, чем при расположении их перпендикулярно к оси вращения шарошки. А также что использование разнонаправленного косозубого вооружения дает возможность создавать буровой инструмент, способный успешно работать в сложных геологических условиях, когда бурение осуществляется в твердых породах, постоянно перемежающихся более пластичными пропластками средних пород, и при этом минимизировать вероятность образования забойной рейки в течение всего времени работы ШБИ.



### 3.6 Исследование процесса взаимодействия зубчатого вооружения с забоем при работе шарошечного долота в составе агрегата реактивно-турбинного бурения

Изучим условия взаимодействия зубчатого вооружения ШД с забоем скважины большого диаметра в процессе бурения агрегатом РТБ. Как уже отмечалось ранее, при данном способе бурения ШД осуществляет сразу два вида вращений - относительное, вокруг собственной оси вращения, и переносное - вокруг оси вращения агрегата. Это приводит к тому, что к обычному проскальзыванию зубьев вооружения шарошки, связанному с перекатыванием ее по поверхности забоя, добавляется дополнительное проскальзывание, возникающее вследствие переносного движения ШД вокруг оси вращения агрегата РТБ.

Для того чтобы определить направления и величины скольжений зубьев вооружения ШД при использовании его в агрегатах РТБ, необходимо исследовать особенности движения шарошек ШД при данном способе бурения. Рассмотрим процесс «перекатывания» шарошки из точки *A* до точки *D* (рисунок 3.18). Становится очевидным, что в таких точках, как *A* и *C*, зубья вооружения будут проскальзывать согласно классическому закону скольжения шарошки с многоконусным профилем, отличным от формы подвижного аксоида. То есть в то время как одна часть зубьев вооружения шарошки, контактирующая с забоем, пробуксовывает, другая подтормаживает. Единственное и существенное отличие от кинематики классического ШД - значительная разница скоростей вращения шарошки в точках *A* и *C* (рисунок 3.18.2).

Наибольший интерес представляет проскальзывание вооружения шарошки при ее «перекатывании» в точках *B* и *D*, где вращение ШД вокруг оси агрегата РТБ не может быть компенсированным за счет дополнительного увеличения или уменьшения скорости вращения шарошки, так как ось ее вращения расположена вдоль направления вращения исполнительного органа агрегата РТБ. Одновременно с этим зубчатое вооружение шарошки, находящееся во взаимодействии с забоем, расположено так, что его площадки притупления тоже ориентированы вдоль направления вращения исполнительного органа агрегата. Следовательно, в процессе «перекатывания» шарошки ШД по поверхности забоя в точках *B* и *D* осуществляется наибольшее проскальзывание зубчатого вооружения по направлению вращения агрегата. Особенность этого проскальзывания заключается в том, что зубья вооружения шарошки скользят не в направлении их набегающих или сбегаящих граней, а в перпендикулярном им направлении (рисунок 3.18). В результате в точках *B* и *D* разрушение породы за счет проскальзывания вооружения в основном происходит или торцами зубьев, со стороны основания шарошки и ее тыльным конусом (точка *B*), или торцами зубьев со стороны вершины шарошки (точка *G*).

Определить величину этого проскальзывания можно следующим образом. Вычислим время контакта зуба вооружения с забоем по следующей формуле [93]:

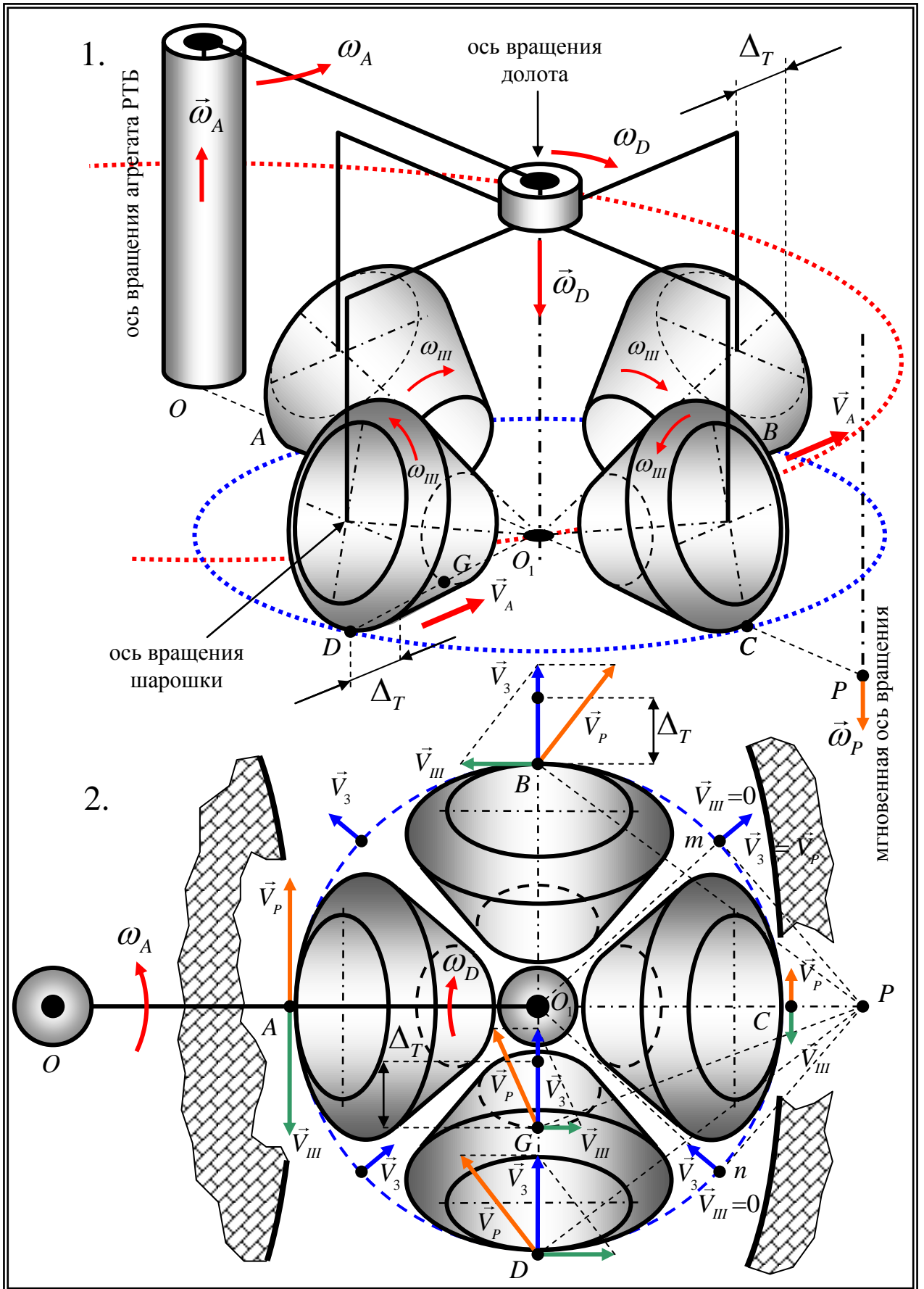


Рисунок 3.18 - Кинематическая схема движения шарошки при РТБ

$$t = \frac{60 \cdot R_{III}^i}{n \cdot z^i \cdot R_D^i}, \quad (3.75)$$

где  $R_{III}^i$  - радиус  $i$ -го венца шарошки, м.;  $R_D^i$  - радиус  $i$ -го венца ШД, м;

$n$  - частота вращения ШД,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $z^i$  - число зубьев на  $i$ -ом венце шарошки.

Тогда для ШД диаметром 490 мм, работающего при  $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ , время контакта зуба вооружения шарошки с забоем будет равно  $t = 0,0022 \text{ с}$ .

Зная время контакта зуба с забоем в точке  $B$  и частоту вращения агрегата, а также его геометрические параметры, можно определить величину проскальзывания вооружения в точке  $B$ , связанное с вращением агрегата.

Расчет осуществим для случая максимального проскальзывания, т. е. для внешнего долота четырехтурбинного агрегата, оснащенного долотами Ш490 С-ЦВР, при бурении ствола диаметром 6 метров.

Длина окружности, описываемая осью вращения внешнего долота вокруг оси вращения агрегата, равна

$$L = 2\pi R_A. \quad (3.76)$$

Тогда величина проскальзывания зуба вооружения ШД, связанная с вращением агрегата, определится как

$$\Delta_T = \frac{L \cdot t \cdot n_A}{60}, \quad (3.77)$$

где  $n_A$  - частота вращения агрегата, равня  $6 \text{ мин}^{-1}$ .

Интерес представляет еще одна отличительная особенность в работе ШД в составе агрегата РТБ, т. е. когда возникают условия способствующие вращению шарошки по направлению вращения ШД (рисунок 3.18). Такое кардинальное изменение направления вращения шарошки обычно возникает на периферийных ШД четырехтурбинных агрегатов больших диаметральных размеров, в тех случаях, когда линейные скорости в крайних точках агрегата имеют большую скорость, чем периферийные точки ШД. Это объясняется тем, что в данном случае мгновенная ось вращения двух параллельных вращений находится за пределами зоны работы агрегата РТБ, в связи с этим на участке кривой  $mCn$  шарошка ШД осуществляет вращение в противоположную сторону. При этом в местах, обозначенных точками  $m$  и  $n$ , скорость вращения шарошки  $\omega_{III}$  обнуляется, а направление и величина скорости зуба вооружения  $V_3$ , при взаимодействии его с породой, совпадают с линейной скоростью его перемещения вокруг мгновенной оси вращения  $V_p$ . В связи с этим, на каждом обороте ШД шарошка изменяет свое направление вращения дважды. При этом сектор вращения шарошки по часовой стрелке  $nAm$  всегда больше, чем

сектор вращения против  $mCn$ . Объясняется это тем, что в противоположном случае будет происходить уменьшение величины суммарного реактивного момента, приводящего в движение агрегат, что неминуемо станет причиной замедления его вращения вплоть до полной остановки.

Однако работа большинства агрегатов РТБ характеризуется тем, что точка  $P$  - мгновенный центр вращения, как правило, находится между осью вращения ШД -  $O_1$  и крайней точкой  $C$  калибрующего конуса шарошки ШД, находящегося на наибольшем удалении от оси вращения агрегата РТБ (рисунок 3.18). В этом случае в процессе работы ШД его шарошки не меняют своего направления вращения, но при этом их движение сопровождается постоянным существенным изменением скоростей их вращения.

Таким образом, определив направление, величину и зону наибольшего проскальзывания зубчатого вооружения ШД, вызванного вращением агрегата РТБ, проведем анализ геометрии вооружения ШБИ с позиции ее соответствия условиям бурения агрегатами РТБ.

Ранее было установлено, что вследствие проскальзывания зубчатого вооружения ШД, вызванного вращением агрегата РТБ, торцевые поверхности всех зубьев вооружения шарошек принимают активное участие в разрушении породы забоя (рисунок 3.18). При этом тыльные конуса шарошек участвуют не только в калибровании стенки и образовании требуемого диаметра скважины, но и при разрушении и выравнивании поверхности горизонтального забоя.

Процесс разрушения породы торцами зубьев вооружения и калибрующими конусами шарошек при РТБ можно уподобить процессу резания с подачей  $\Delta_T$  и глубиной  $k$  (рисунок 3.19), (рисунок 3.23).

На (рисунок 3.19.1) показана схема взаимодействия с забоем прямозубого вооружения шарошки ШД, находящегося в точке  $B$ . Как видно из рисунка, суммарная площадь поражения забоя зубчатым вооружением ШД равна сумме площадей прямоугольников, образованных величиной скольжения  $\Delta_T$  и шириной торцевой поверхности зубьев  $h$ .

Очевидно, что эффективность работы зубчатого вооружения ШД, при перемещении в данном направлении, является минимальной.

Увеличить площадь поражения забоя, можно посредством оснащения шарошек КЗВ (рисунок 3.19.2) и (рисунок 3.19.3). Прирост площади поражения забоя при использовании КЗВ в сравнении с прямозубым вооружением определяется как разница площадей соответствующих фигур (рисунок 8.10):

$$S_1 = a\Delta_T; S_2 = a\Delta_T; S_3 = S_1 + b\Delta_T \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.78)$$

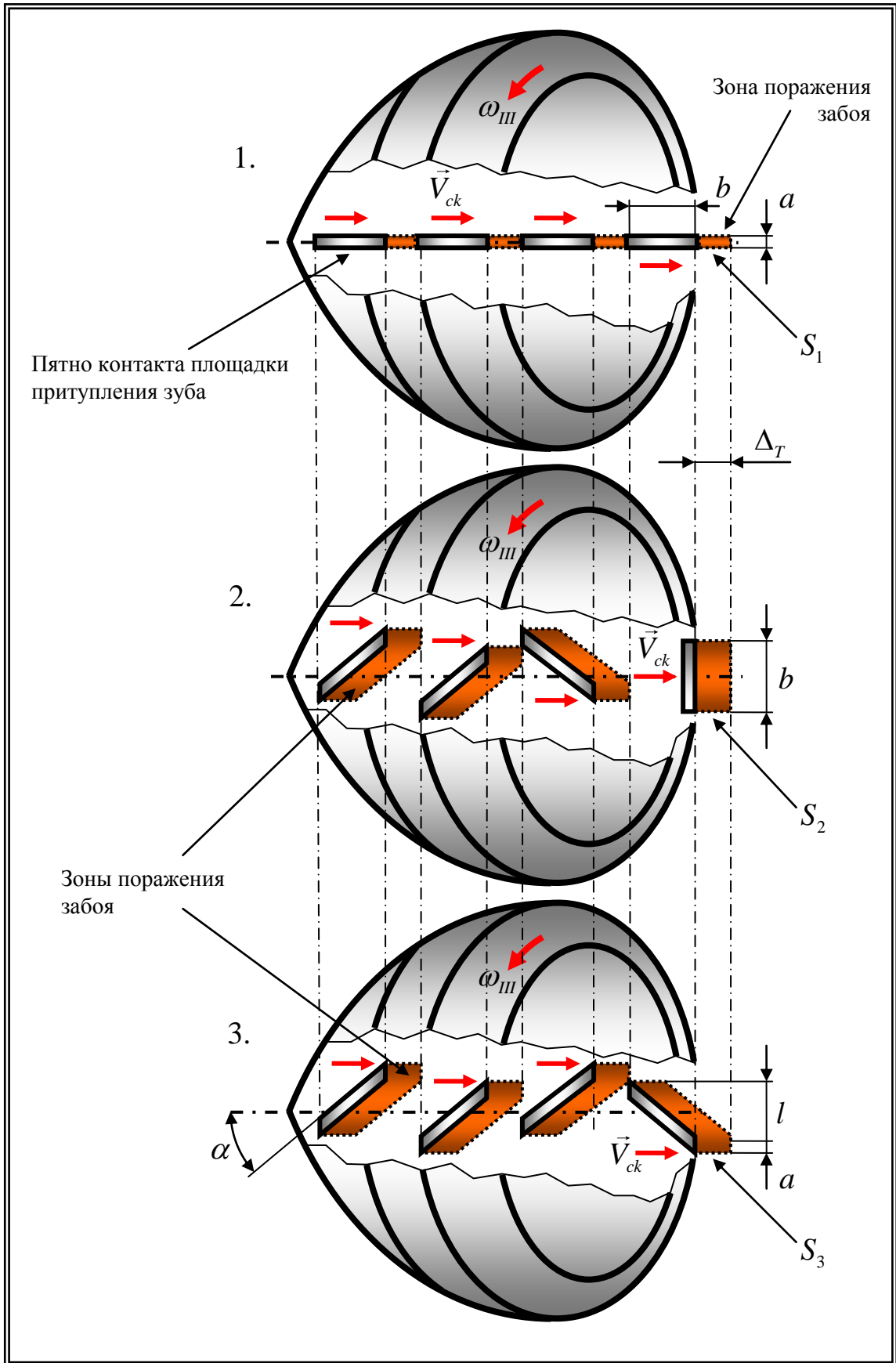


Рисунок 3.19 - Схема поражения заоя ПЗВ  
 и КЗВ шарошек в условиях РТБ

Таким образом, при оснащении шарошек ШД разнонаправленным КЗВ существенно увеличивается суммарная площадь поражения забоя зубчатым вооружением шарошек и интенсифицируется процесс эвакуации выбуренного шлама из зоны работы инструмента.

Однако с целью достижения максимальной эффективности работы КЗВ в условиях РТБ нужно при создании вооружения ШД обеспечить строго определенную ориентацию зубьев разных венцов вооружения шарошек (рисунок 3.20), на котором:

$F_1^1$  - сила сопротивления породы на первый зуб калибрующего венца шарошки;

$F_2^1$  - сила сопротивления породы на первый зуб второго венца шарошки;

$F_2^2$  - сила сопротивления породы на второй зуб второго венца шарошки;

$F_1^3$  - сила сопротивления породы на первый зуб третьего венца шарошки;

$\alpha, \beta, \gamma$  - углы наклона КЗВ к оси шарошки на соответствующих венцах.

При этом  $R_1^1, R_1^2, R_2^2, R_1^3$  - осевые составляющие вышеперечисленных усилий, стремящиеся дополнительно повернуть шарошку вокруг ее оси.

Чтобы исключить возможность дополнительного проворота шарошки вследствие действия этих сил и тем самым обеспечить максимальную эффективность работы набегающих и сбегающих граней зубьев при их продольном проскальзывании, нужно, чтобы соблюдались следующие условия [81]:

- для 1-го варианта расположения зубьев:

$$M_{K1}^1 \approx M_{K1}^2 + M_{K2}^2, \quad (3.79)$$

в связи с тем, что:

$$M_{K1}^1 = R_1^1 r_1^1 = F_1^1 r_1^1 \cos \alpha \sin \alpha; \quad M_{K1}^2 = R_1^2 r_1^2 = F_1^2 r_1^2 \cos \beta \sin \beta; \quad M_{K2}^2 = R_2^2 r_2^2 = F_2^2 r_2^2 \cos \beta \sin \beta. \quad (3.80)$$

то выражение преобразуется в следующее:

$$F_1^1 r_1^1 \cos \alpha \sin \alpha \approx F_1^2 r_1^2 \cos \beta \sin \beta + F_2^2 r_2^2 \cos \beta \sin \beta. \quad (3.81)$$

- для 2-го варианта расположения зубьев:

$$M_{K1}^1 \approx M_{K1}^2 + M_{K1}^3; \quad (3.82)$$

$$M_{K1}^1 = R_1^1 r_1^1 = F_1^1 r_1^1 \cos \alpha \sin \alpha; \quad M_{K1}^2 = R_1^2 r_1^2 = F_1^2 r_1^2 \cos \beta \sin \beta; \quad M_{K1}^3 = R_1^3 r_1^3 = F_1^3 r_1^3 \cos \gamma \sin \gamma; \quad (3.83)$$

$$F_1^1 r_1^1 \cos \alpha \sin \alpha \approx F_1^2 r_1^2 \cos \beta \sin \beta + F_1^3 r_1^3 \cos \gamma \sin \gamma, \quad (3.84)$$

где

$r_1^1, r_1^2, r_2^2, r_1^3$  - наименьшие расстояния от оси шарошки ШД до мест приложения сил к

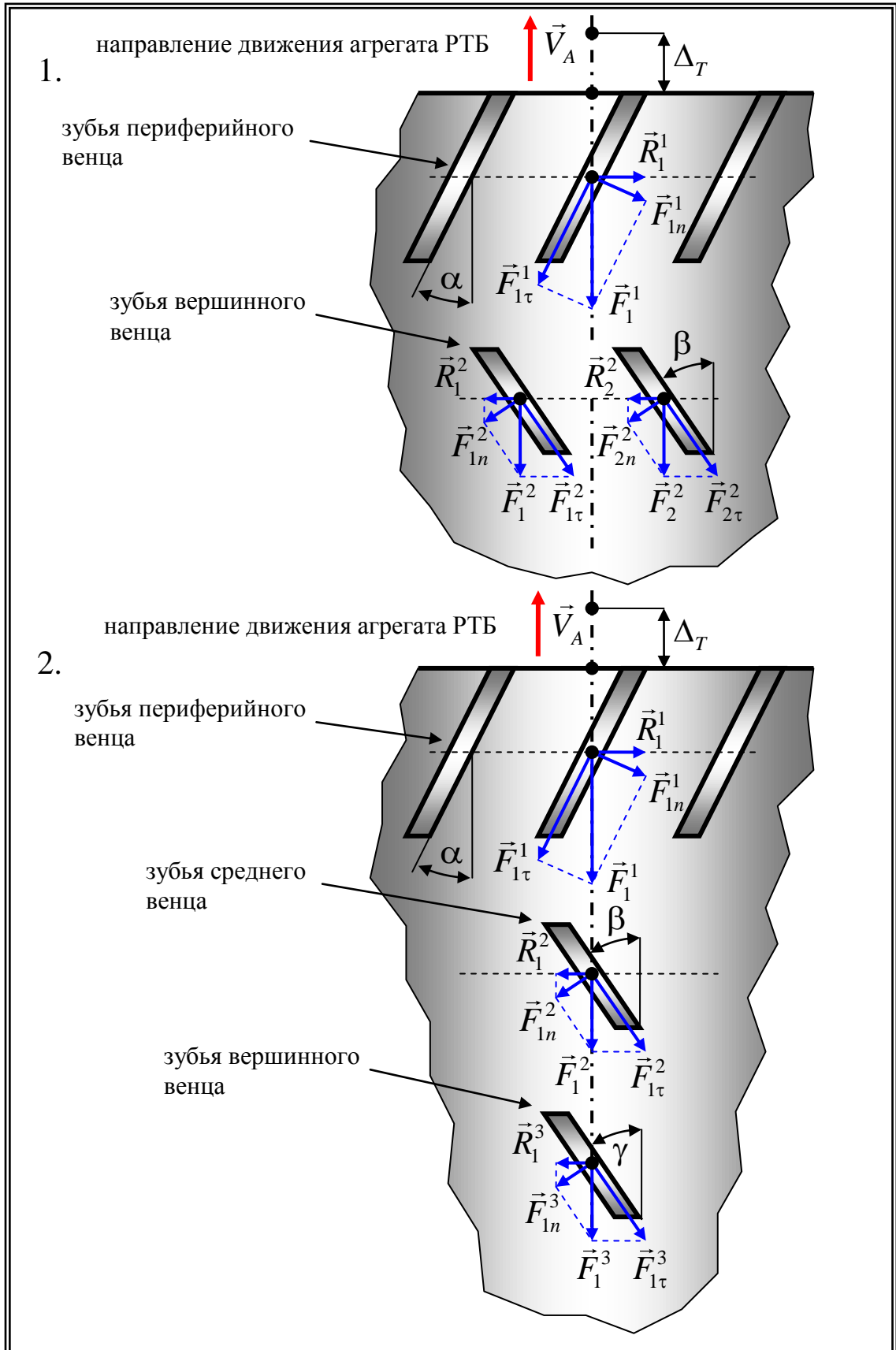


Рисунок 3.20 - Принципиальная схема КЗВ шарошек для РТБ

1 - двухвенцовый вариант; 2 - многовенцовый вариант

соответствующим зубьям соответствующих венцов вооружения, т. е. крутящий момент, действующий на шарошку от одного зуба, находящегося во взаимодействии с породой калибрующего венца, должен быть приблизительно равен сумме крутящих моментов, возникающих от зубьев вершинного венца или от двух и более зубьев основного и вершинного венцов.

Реализация данного условия в геометрии вооружения шарошек позволяет повысить эффективность работы набегающих и сбегающих граней зубьев инструмента в моменты их одновременного взаимодействия с породой забоя, в процессе проскальзывания зубчатого вооружения ШД, вызванного вращением агрегата.

В свою очередь анализ износа зубчатого вооружения серийных ШД, как недоработанных, так и по завершении их работы в агрегатах РТБ, показал, что изнашивание вооружения шарошек происходит достаточно неравномерно. В первоначальный период бурения наиболее интенсивному изнашиванию подвергается зубчатое вооружение вершинного (для классических ШД) и основного (для ШД для РТБ) конусов шарошек, и только при их достаточном износе вступает в работу и начинает изнашиваться вооружение периферийного или калибрующего венца (рисунок 3.21.1 и 3.21.2). Это объясняется тем, что бурение способом РТБ, ввиду планетарного движения инструментов, происходит с образованием горизонтального плоского забоя. В результате происходит значительное снижение эффективности бурения, так как в начале работы ШД происходит сильный износ зубчатого вооружения вершинного и основного конусов шарошек, вследствие значительного повышения контактных напряжений, обусловленных недостаточной загруженностью зубьев вооружения периферийного или калибрующего венца.

В процессе дальнейшей работы ШД значительно снижается механическая скорость бурения из-за уменьшения удельного давления, создаваемого зубчатым вооружением на поверхности забоя. Это связано с тем, что после интенсивного полного износа зубчатого вооружения вершинного и основного конусов ШД шарошка «садится» этими «облысевшими» венцами на поверхность забоя и не позволяет полностью нагрузить хорошо сохранившееся, зубчатое вооружение периферийных венцов шарошек ШД. На (рисунок 3.23.1) представлена схема воздействия вооружения серийного ШД с забоем в месте (точка *B*) повышенного проскальзывания связанного с вращением агрегата РТБ в начале работы инструмента.

Так как образующие шарошек серийного ШД для РТБ, находящиеся в соприкосновении с породой, расположены не горизонтально, то в процессе проскальзывания зубчатого вооружения на величину  $\Delta_T$ , по направлению вращения агрегата, происходят частичное отжатие и перекос ШД относительно поверхности забоя, а также увеличение вертикальных колебаний инструмента. Помимо этого увеличиваются ударные нагрузки калибрующих поверхностей шарошек о стенки ствола, что нередко приводит к значительным сколам



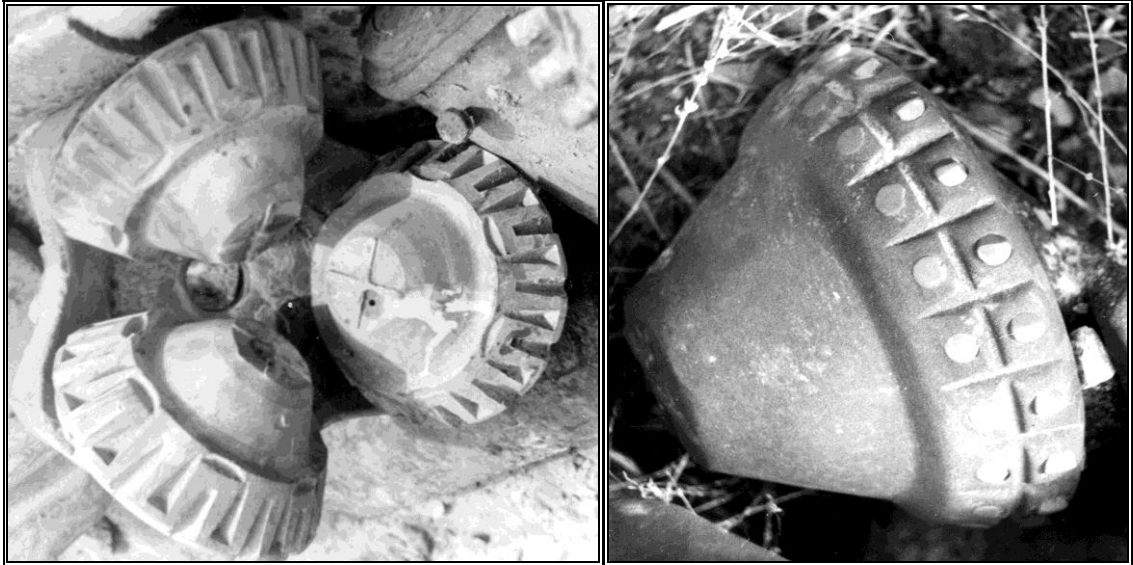


Рисунок 3.21 - Буровые долота после отработки в агрегате РТБ

1 - долото Ш490С-ЦВР; 2 - долото Ш490ТЗ-ЦВР

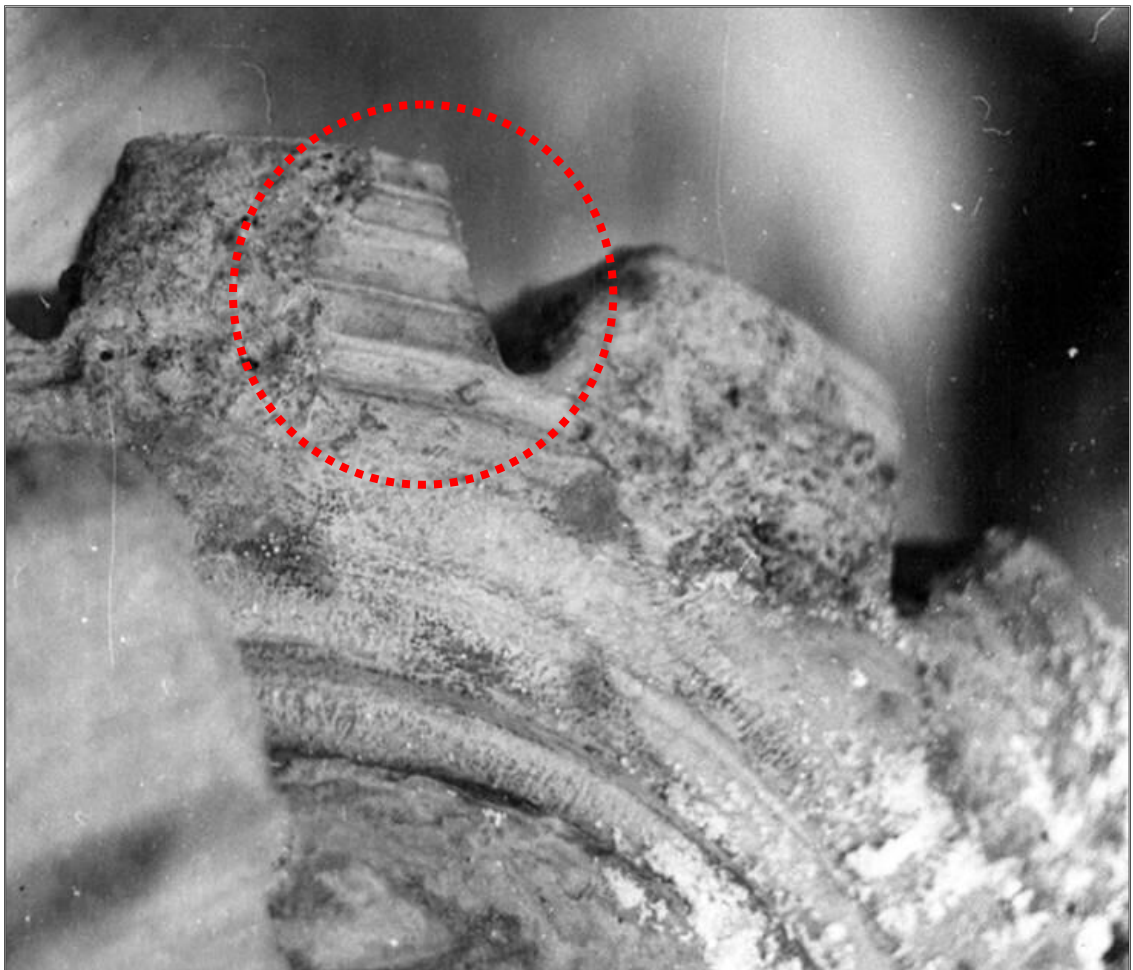


Рисунок 3.22 - Скол армированного слоя на тыльном конусе шарошки

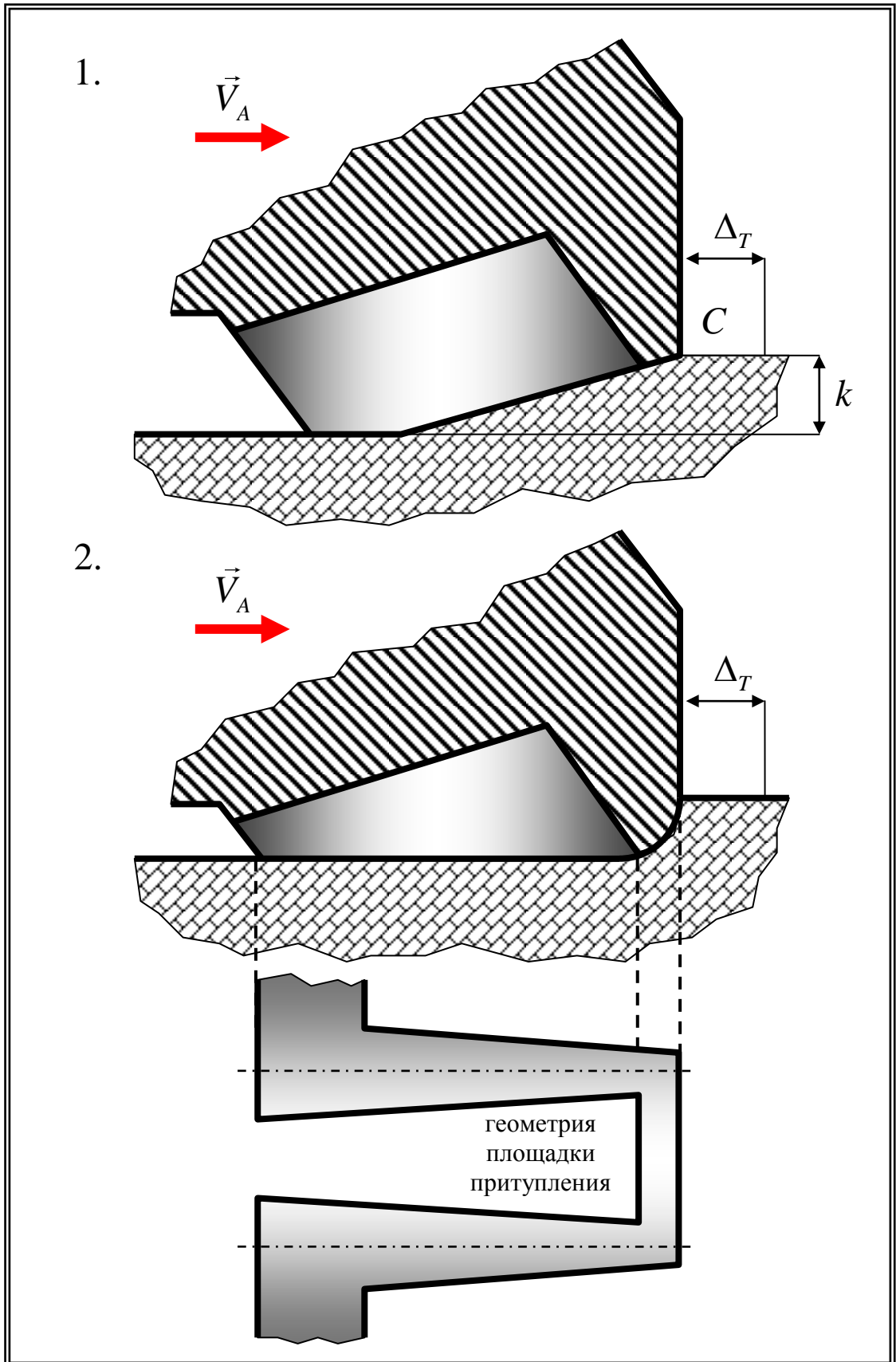


Рисунок 3.23 - Схема взаимодействия с забоем и износа зубчатого вооружения серийного ШД в процессе РТБ  
1 - в начальный период бурения; 2 - в заключительный период

твердосплавной наплавки (рисунок 3.22). В результате этого тыльные конусы шарошек ШД в первоначальный период работы инструмента фактически не принимают участия в разрушении поверхности забоя, а лишь в формировании и калибровании стенки скважины, что существенно снижает эффективность работы агрегата РТБ.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что в процессе разрушения породы забоя наибольшее участие принимает зубчатое вооружение периферийных или калибрующих венцов шарошек, тем не менее вершинные и основные венцы тоже активно участвуют в данном процессе. Все зубья вооружения ШД совершают значительно большие проскальзывания по забою, чем при обычном способе бурения, с постоянно меняющимся направлением и величиной скольжения. А также математически было доказано, что оснащение шарошек ШД разнонаправленным КЗВ дает возможность значительно увеличить площадь поражения забоя, особенно в местах наибольшего проскальзывания шарошек в направлении вращения агрегата РТБ.

### **Выводы по главе 3**

1 Изучение факторов, влияющих на эффективность разрушения мягких и средних пород зубчатым вооружением ШБИ, позволило установить, что работа ведомых венцов шарошек, работающих с проскальзыванием вооружения, подобна работе цилиндрических фрез, и, соответственно, многие из конструктивных особенностей геометрических параметров рабочих поверхностей цилиндрической фрезы, способствующих повышению эффективности ее работы, могут быть использованы при создании новых конструкций зубчатого вооружения ШБИ.

2 Исследование процесса силового взаимодействия зубьев вооружения шарошек с забоем позволило установить, что придание зубьям ведомых венцов шарошек ШБИ, работающих в режиме проскальзывания вооружения, асимметричной формы с наклонными площадками при тупления позволяет значительно снизить энергоемкость процесса разрушения породы и одновременно уменьшить нагрузки, действующие на зубчатое вооружение и другие элементы ШБИ.

3 Проведенные исследования процесса работы ШБИ при бурении мягких и средних пород позволили установить, что его шарошки «перекатываются» по забою со скольжением, поэтому должны оснащаться геометрией зубчатого вооружения, позволяющей обеспечивать зубьям шарошек такие абсолютные и относительные скорости, а также углы между направлениями равнодействующих нормальных сил и осевой нагрузкой на инструмент, при которых среднее значение отношения абсолютной и переносной скоростей для каждой шарошки ШБИ было бы наибольшим. А также установлено влияние размеров, расположения и разнонаправленности

зубьев вооружения на равномерность распределения крутящего момента по всем шарошкам ШБИ.

4 Проведенное исследование отклоняющих и стабилизирующих сил, возникающих в процессе работы косозубого вооружения ШБИ, позволило выявить некоторые особенности работы данного вида вооружения в отличие от классического прямозубого. На этой основе были разработаны технические решения, которые в значительной степени помогают компенсировать воздействия дополнительных отклоняющих усилий, возникающих при работе косозубого вооружения.

5 Исследование факторов, влияющих на эффективность разрушения средних и твердых пород ШБИ, позволило установить, что при одновременном воздействии на забой двух зубьев вооружения ШБИ существует такое оптимальное расстояние между их вершинами, при котором будет достигаться максимально возможный эффект от сложения волн напряжений, создаваемых ими в разбуриваемой породе, а также что при расположении зубьев вооружения большими сторонами их площадок притупления вдоль образующей шарошки эффективность разрушения породы забоя путем одновременного вдавливания будет значительно ниже, чем при расположении их перпендикулярно к оси вращения шарошки. А также, что использование разнонаправленного косозубого вооружения дает возможность создавать буровой инструмент, способный успешно работать в сложных геологических условиях, когда бурение осуществляется в твердых породах, постоянно перемежающихся более пластичными пропластками средних пород и при этом минимизировать вероятность образования забойной рейки в течение всего времени работы ШБИ.

6 Исследование процесса взаимодействия зубчатого вооружения с забоем при работе ШД в составе агрегата РТБ позволило установить, что в процессе разрушения породы забоя наибольшее участие принимает зубчатое вооружение периферийных или калибрующих венцов шарошек, тем не менее вершинные и основные венцы тоже активно участвуют в данном процессе. Все зубья вооружения ШД совершают значительно большие проскальзывания по забою, чем при обычном способе бурения, с постоянно меняющимся направлением и величиной скольжения. А также математически было доказано, что оснащение шарошек ШД разнонаправленным КЗВ дает возможность значительно увеличить площадь поражения забоя, особенно в местах наибольшего проскальзывания шарошек в направлении вращения агрегата РТБ.

**ГЛАВА 4.****ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЬЕВ И АРМИРОВАННОЙ ЗОНЫ НА ПРОЧНОСТЬ ВООРУЖЕНИЯ ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ЕГО РАБОТЫ****4.1 Методика расчета максимальных изгибающих нагрузок, действующих на зубья шарошечного бурового инструмента, работающего без проскальзывания вооружения**

При проектировании зубчатого вооружения ШБИ нужно хорошо представлять направления и величины воздействующих на него максимально возможных нагрузок, возникающих при работе инструмента в штатных условиях бурения. Рассмотрим на примере поверхностно-армированного зубчатого вооружения работу ведущего венца или венцов вооружения шарошек, работающих без скольжения по забою.

Как известно, упрочнение стального зубчатого вооружения шарошек методом поверхностного армирования твердым сплавом позволяет существенно повысить износостойкость вооружения и, как следствие, эффективность работы шарошечного бурового инструмента. Тем не менее опыт эксплуатации и многочисленные исследования показали, что при бурении данным видом инструмента, когда его вооружение подвергается значительным, постоянно изменяющим свое направление динамическим нагрузкам, происходит быстрое изнашивание зубьев шарошек.

Поэтому важным моментом в процессе проектирования и разработки данного типа вооружения является расчет геометрических параметров зубьев на основе допускаемых напряжений при изгибе, с учетом физико-механических характеристик как стального вооружения, так и армирующего материала.

Расчет геометрии поверхностно-армированного зубчатого вооружения следует осуществлять с обязательным учетом физико-механических характеристик армированного слоя, а также эксплуатационных параметров (осевая нагрузка на ШД, его скорость вращения и т. д.) бурения ШБИ.

Вначале необходимо определить максимальные изгибающие нагрузки, действующие на зубья поверхностно-армированного вооружения ведущих (работающих без проскальзывания) венцов ШБИ, возникающие в процессе работы инструмента.

Анализ сил, воспринимаемых зубчатым вооружением, в то время когда шарошка ШД воздействует на поверхность забоя 2-мя соседними зубьями, показал, что в этом случае результирующая сила реакции забоя на набегающий зуб вооружения будет складываться из суммы динамической и статической составляющих (рисунок 4.1). При этом величина силы реакции забоя, действующей на набегающий зуб вооружения шарошки, определяется как

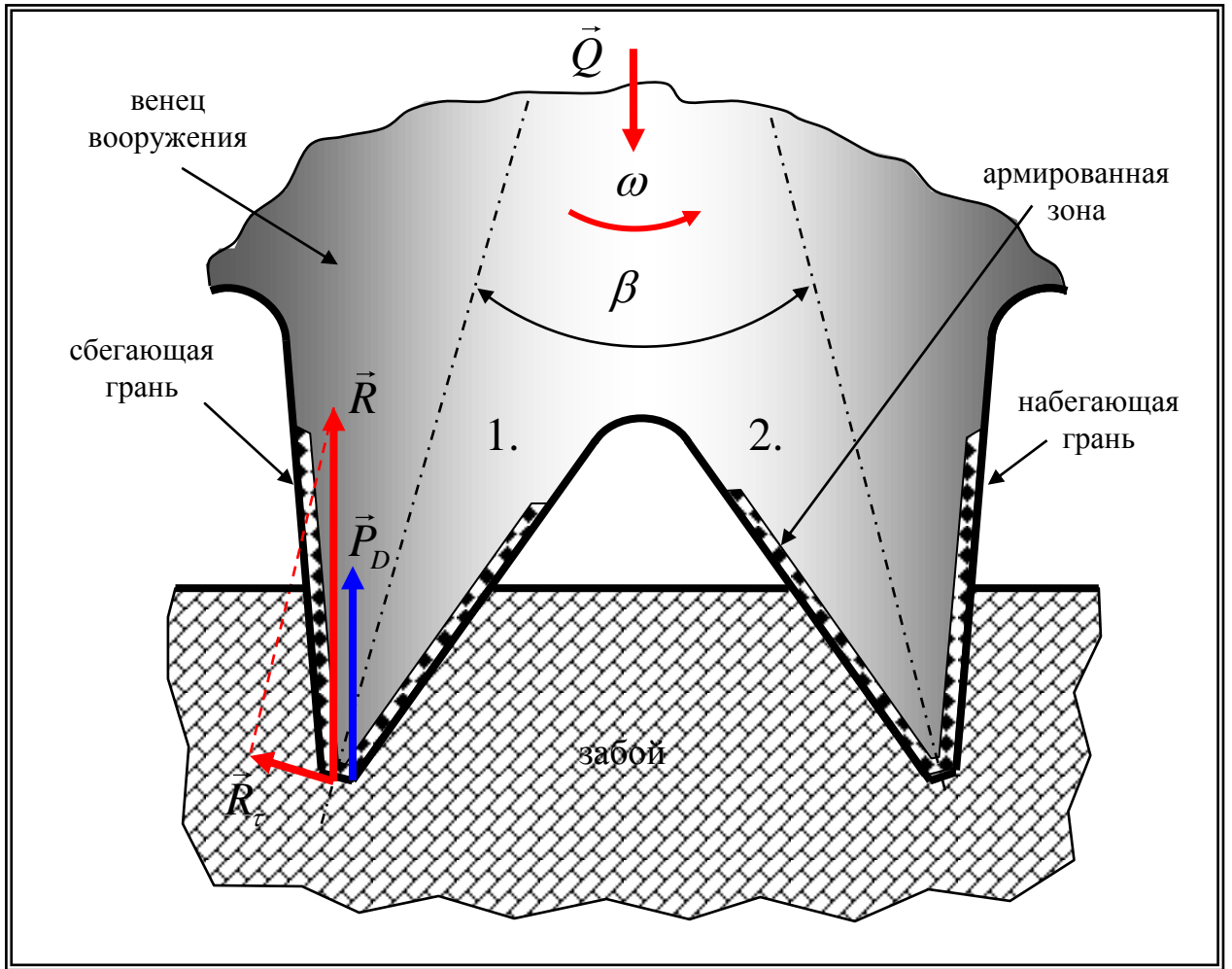


Рисунок 4.1 - Принципиальная схема сил, действующих на вооружение ведущего венца шаровки ШБИ в процессе его работы

$$R = \frac{N}{2} + P_D, \quad (4.1)$$

где

$N$  – сила реакции породы забоя, Н;  $P_D$  – сила ударного взаимодействия зуба с забоем, Н.

С учетом того факта, что [93]

$$N = (0,1 \div 0,3) Q, \quad (4.2)$$

где  $Q$  – осевая нагрузка на долото, Н.

Сила динамического воздействия зуба на поверхность забоя определяется по следующей формуле:

$$P_D = \frac{N}{2g} \omega_0, \quad (4.3)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $9,81 \text{ м/сек}^2$ ;  $\omega_0$  – угловая скорость ведущего венца, рад/с.

$$\omega_0 = \frac{\pi^2 R_{III} n_{III}^2}{900} \cos \gamma, \quad (4.4)$$

где

$R_{III}$  – радиус ведущего венца шарошки ШД, м;  $\gamma$  – угол наклона оси шарошки, относительно оси вращения ШД, град.;  $n_{III}$  – частота вращения шарошки в мин.

В этом случае уравнение (4.3) примет вид

$$P_D = \frac{\pi^2 N R_{III} n_{III}^2 \cos \gamma}{1800g}. \quad (4.5)$$

Общее усилие на зубчатый элемент определится как

$$R = \frac{N}{2} \left[ 1 + \frac{\pi^2 R_{III} n_{III}^2 \cos \gamma}{1800g} \right]. \quad (4.6)$$

Тогда изгибающая составляющая общего усилия будет равна:

$$R_r = \frac{N}{2} \left[ 1 + \frac{\pi^2 R_{III} n_{III}^2 \cos \gamma}{1800g} \right] \sin \frac{\beta}{2}. \quad (4.7)$$

После определения максимальной изгибающей нагрузки, действующей на зубчатое вооружение ведущего венца ШБИ, можно осуществлять расчет зубьев вооружения на прочность.

#### **4.2 Сравнительный анализ статической прочности прямозубого и косозубого поверхностно-армированного вооружения**

Важным этапом при проектировании ШБИ со стальным армированным зубчатым вооружением, безусловно, считается определение его геометрических параметров на основе расчетов по различным прочностным показателям, одним из которых является анализ статической прочности зубчатого вооружения. В настоящее время имеется несколько методик, дающих возможность оценить прочность этого типа вооружения, тем не менее ни одна из них не имеет возможности учитывать большое количество конструкторских и технологических параметров: анизотропию материалов, сложную геометрию вооружения и так далее.

Наиболее эффективным методом расчета на прочность поверхностно-армированного зубчатого вооружения (ПАЗВ) ШБИ, изготовленного из разных, по своим физико-механическим характеристикам материалов в условиях незначительных деформаций, является метод конечных элементов (МКЭ). На (рисунок 4.2) представлена конечно-элементная модель поверхностно-армированного зуба вооружения ШБИ.

Конечно-элементная реализация расчета в процессе моделирования конструкций дает возможность снять множество ограничений, таких как технологические параметры процесса

бурения, композиционные материалы и сложная геометрия деталей. Решение различных конструкторских задач с использованием метода конечных элементов дает возможность осуществлять расчет напряженно-деформированного состояния деталей, проводить мероприятия по оптимизации конструкции с целью повысить ее способность к восприятию эксплуатационных нагрузок за счет снижения напряженно-деформированного состояния.

Для того чтобы решить задачу прочностного анализа с использованием МКЭ, необходимо последовательно пройти ряд основных этапов [32, 92]: идентифицировать задачи и выбрать пути их решения; создать геометрии моделей, пригодных для МКЭ; разбить модели сеткой конечных элементов; приложить к модели граничные условия; численно решить системы уравнений; проанализировать полученные результаты.

В строгом соответствии с вышеперечисленными этапами проведем описание использования МКЭ.

Для получения значений в узлах необходимо решить систему линейных уравнений вида:

$$[K] \cdot \{x_n\} = \{F\}, \quad (4.8)$$

где

$K$  - глобальная матрица жесткости, определяющаяся из суммы локальных матриц.

Матрица жесткости это геометрические характеристики элемента, его координаты в совокупности с физико-механическими свойствами элемента (зависит от типа решаемой задачи).

$$\begin{bmatrix} k_{11} & \dots & k_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ \dots \\ F_n \end{Bmatrix} \quad (4.9)$$

Матрица жесткости детали определяется суммой подматриц всех входящих в нее элементов:

$$[K] = \sum_{e=1}^n [K]^e; \quad (4.10)$$

с учетом того, что матрица жесткости отдельного элемента

$$[K]^e = \int_{V^e} [B]^T [D][B] dV, \quad (4.11)$$

где символ  $e$  идентифицирует матрицы элементов.

$\begin{Bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{Bmatrix}$  - значения в узлах.  $\begin{Bmatrix} F_1 \\ \dots \\ F_n \end{Bmatrix}$  - вектор узловых сил, граничные условия, действующие на модель (давление, сила, температура, закрепление).



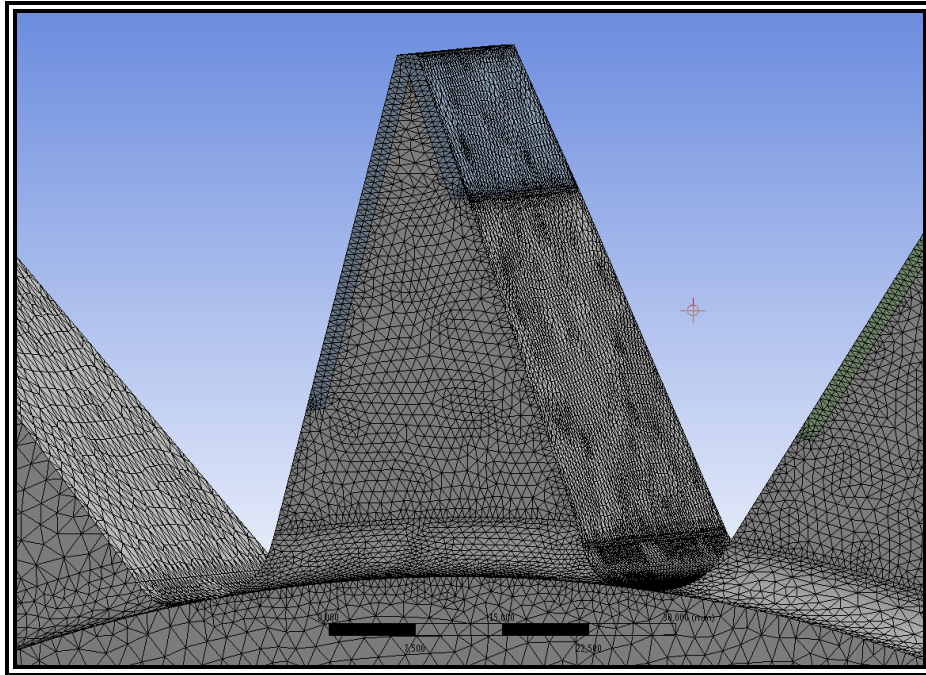


Рисунок 4.2 - Конечно-элементная модель поверхностно-армированного зуба

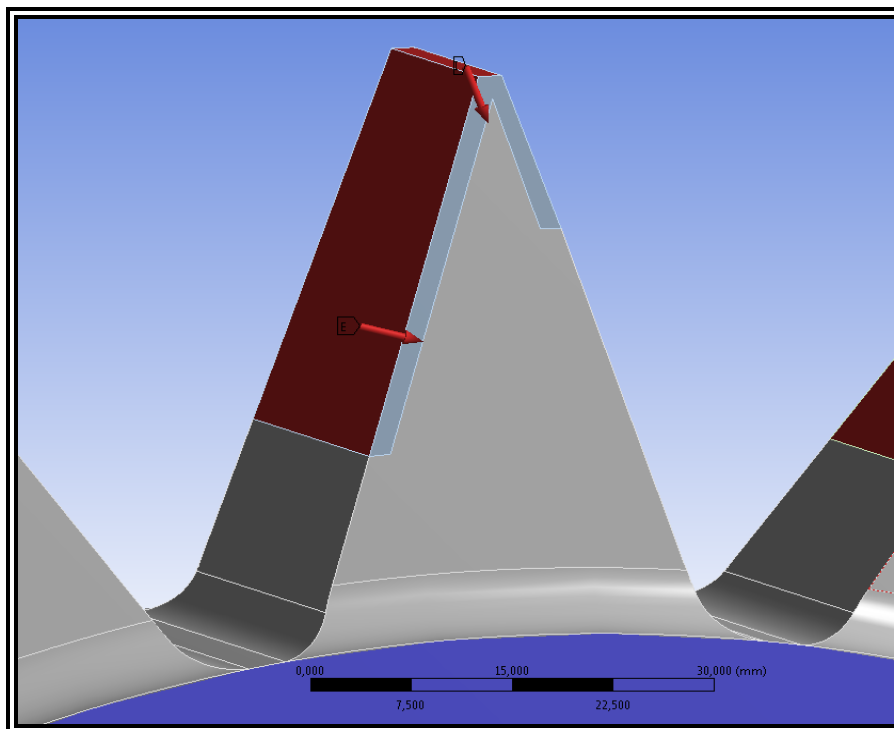


Рисунок 4.3 - Схема приложения нагрузки

Матрица  $[B]$  - матрица формы, характеризующая положение координат узлов элемента в пространстве, которая состоит из матрицы формы  $[N]$ .

Функции формы элемента  $N'_i, N'_j, \dots$ , записываются в зависимости от типа конечного элемента [32]. Например, треугольный элемент узлов имеет функцию формы равную трем.

Функцию формы  $N'_i$  можно определить по следующей формуле:

$$N'_i = \frac{a_i + b_i r + c_i z}{2\Delta}, \quad (4.12)$$

где

$\Delta$  - площадь треугольника (элемента) с размерами сторон  $a_i, b_i, c_i$ .

Выбор функций формы осуществляется с таким расчетом, чтобы в процессе подстановки координат узлов осуществлялись определенные перемещения узлов.

Матрица элемента  $[B]$  включает в себя подматрицы узлов. В свою очередь каждая подматрица создается путем перестановки (циклически) элементов матрицы для одного узла. Вид матриц формы узлов определяется типами конечных элементов и соответствующими функциями координат узловых точек [92]:

$$[B_i] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial N'_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N'_i}{\partial r} & 0 \\ \frac{1}{r} N'_i & 0 \\ \frac{\partial N'_i}{\partial z} & \frac{\partial N'_i}{\partial r} \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$

Перемещение любой точки внутри конечного элемента, по теории МКЭ, определяется соотношением

$$\{x\} = [N] \{\delta\}^e = [N_i, N_j, N_m, \dots] \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_m \\ \dots \end{Bmatrix}, \quad (4.14)$$

где

компоненты  $[N]$  - функции положения;

$\{\delta\}^e$  - перемещения узловых точек элемента;

$[I]$  - матрица Якобиан (единичная).

Общее количество узлов элемента напрямую зависит от его типа и формы

$$\{\delta\}^e = \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_k \end{Bmatrix}. \quad (4.15)$$

При пластической деформации деталей (значения напряжений  $\sigma_i$  и деформаций  $\varepsilon_i$  превышают предел упругости) осуществляется корректировка коэффициентов физико-механических характеристик материалов по действительной диаграмме растяжения.

Если рассчитаны перемещения в каждой точке элемента, деформации в детали определяются как [32]

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = [B]\{\delta\}^e. \quad (4.16)$$

Деформации по всему объему элемента будут постоянны только в том случае, если функции формы представляют собой линейные зависимости.

Согласно закону Гука и начального напряженного состояния и напряжения определяются как

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\}, \quad (4.17)$$

где

$[D]$  – матрица упругости, содержащая характеристики материала;

$\{\varepsilon\}$  и  $\{\varepsilon_0\}$  – конечная и начальная деформации;

$\{\sigma\}$  и  $\{\sigma_0\}$  – напряжения.

Для изотропных материалов матрица упругости  $[D]$  записывается в виде [32]

Полагая, что у изотропного материала  $E_1 = E_2 = E$  (или  $n = 1$ ),  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$  и зависимость между упругими постоянными равна

$$\frac{G_2}{E_2} = \frac{G}{E} = m = \frac{1}{2(1+\mu)}; \quad (4.18)$$

$$[D] = \frac{E_i(1-\mu_i)}{(1+\mu_i)(1-2\mu_i)} \begin{vmatrix} 1 & \frac{\mu_i}{(1-\mu_i)} & \frac{\mu_i}{(1-\mu_i)} & 0 \\ \frac{\mu_i}{(1-\mu_i)} & 1 & \frac{\mu_i}{(1-\mu_i)} & 0 \\ \frac{\mu_i}{(1-\mu_i)} & \frac{\mu_i}{(1-\mu_i)} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu_i}{2(1-\mu_i)} \end{vmatrix}, \quad (4.19)$$

где

$\mu_i$  и  $E_i$  – коэффициент Пуассона и модуль упругости для  $i$ -й итерации при решении задачи, связанной с упруго-пластическими деформациями [32].

При расчетах тел, обладающих ортотропными или анизотропными свойствами, матрица  $[D]$  трансформируется, согласно положению плоскости каждого изотропного слоя.

В случае анизотропных материалов, матрица упругости  $[D]$  создается аналогично, согласно положению плоскости каждого изотропного слоя. Если ось  $Z$  расположена перпендикулярно к плоскостям слоев, то, не учитывая нормальные деформации, и в соответствии с принятыми обозначениями  $\frac{E_1}{E_2} = n$  и  $\frac{G_2}{E_2} = m$  получим:

$$[D] = \frac{E_2}{(1+\mu_1)(1-\mu_1-2n\mu_2^2)} \begin{vmatrix} 1-\mu_1^2 & n\mu_2(1+\mu_1) & n\mu_2(1+\mu_1) & 0 \\ n\mu_2(1+\mu_1) & n(1-n\mu_2^2) & n(\mu_1-n\mu_2^2) & 0 \\ n\mu_2(1+\mu_1) & n\mu_2(1+\mu_1) & n(1-n\mu_2^2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m(1+\mu_1)(1-\mu_1-2n\mu_2^2) \end{vmatrix}. \quad (4.20)$$

Результаты решения позволяют описать характер распределения напряженно-деформированного состояния.

Распределенные нагрузки и напряжения, которые возникают на границах элемента, эквивалентны (статически) узловым силам элемента

$$\{F\}^e = \{F_i, F_j, F_m, \dots\}^T, \quad (4.21)$$

при этом каждая сила  $\{F_i\}$  имеет столько же компонент, как и соответствующее ей узловое перемещение  $\{\delta_i\}$ .

Распределенные нагрузки  $\{P\}$  это нагрузки, которые приходятся на единичный объем материала элемента и при этом действующие по направлениям, соответствующих направлениям перемещений  $\{x\}$  в данной точке.

Граничным условием при решении задачи являются силы, действующие на зуб со стороны поверхности забоя, определяемые по формуле (6). Схема нагружения зуба вооружения шарошки представлена на (рисунок 4.3).

Расчетам были подвергнуты поверхностно-армированные зубья (рисунок 4.4) двух типов вооружения шарошек бурового инструмента: прямозубого и косозубого. При этом геометрия поперечных сечений обоих зубьев – одинакова. Материал стальной основы зуба - сталь 20ХН3А. Поверхностное упрочнение основных рабочих граней - гранулированный релит, наплавленный электродуговым способом с толщиной поверхностного слоя 2 мм.

На первом этапе исследования были проведены расчеты по определению напряжений в различных точках прямозубого поверхностно-армированного вооружения (рисунок 4.4.а), возникающих в процессе его работы на забое (рисунок 4.5).

Одним из способов увеличения долговечности вооружения, является создание конструкторско-технологическими методами условий для снижения возникающих в нем напряжений в процессе его работы. В механике известен способ снижения нагруженности зубьев шестерней редукторов и коробок передач за счет замены прямозубых передач косозубыми. Данный принцип был использован и для создания шарошки с косозубым поверхностно-армированным вооружением.

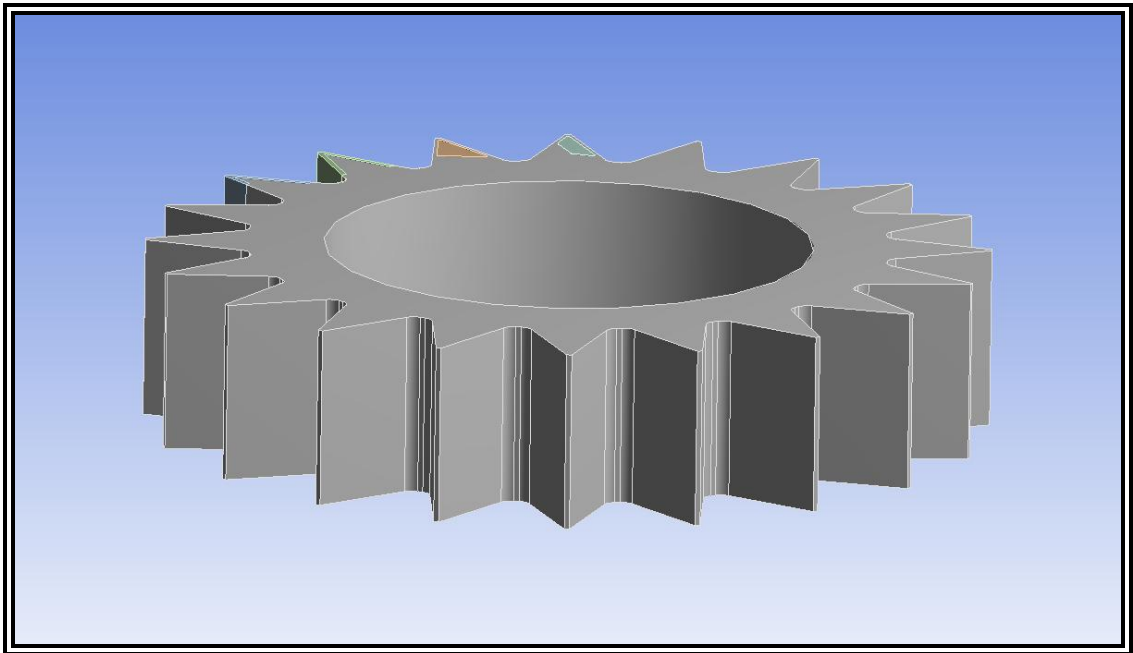
На втором этапе были проведены аналогичные расчеты по определению напряжений в одноименных точках поперечных сечений, что и в первом случае, для косозубого поверхностно-армированного вооружения (рисунок 4.4.б), при воздействии аналогичных изгибающих нагрузок. Результаты расчетов представлены на эпюрах напряжений (рисунок 4.5) и (рисунок 4.6).

Проведенные исследования показали:

- при одинаковых нагрузках напряжения, возникающие в косозубом вооружении (с углом наклона зубьев к образующей шарошки  $25^0$ ) в самом опасном сечении ниже в 2 раза, чем в аналогичном сечении прямозубого вооружения (ПЗВ) (рисунок 4.7);
- существует возможность варьировать конструктивными параметрами зубьев и их физико-механическими свойствами с целью снижения результирующих напряжений, возникающих в вооружении в процессе его работы, и тем самым повысить стойкость и долговечность породоразрушающего бурового инструмента [97].

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют от том, что оснащение шарошек косозубым вооружением даст возможность создавать буровой инструмент с более острыми углами заострения зубьев при одновременном сохранении их прочности, что позволит улучшить внедряемость вооружения в поверхность забоя и тем самым будет способствовать повышению механической скорости бурения и проходки на инструмент.

1.



2.

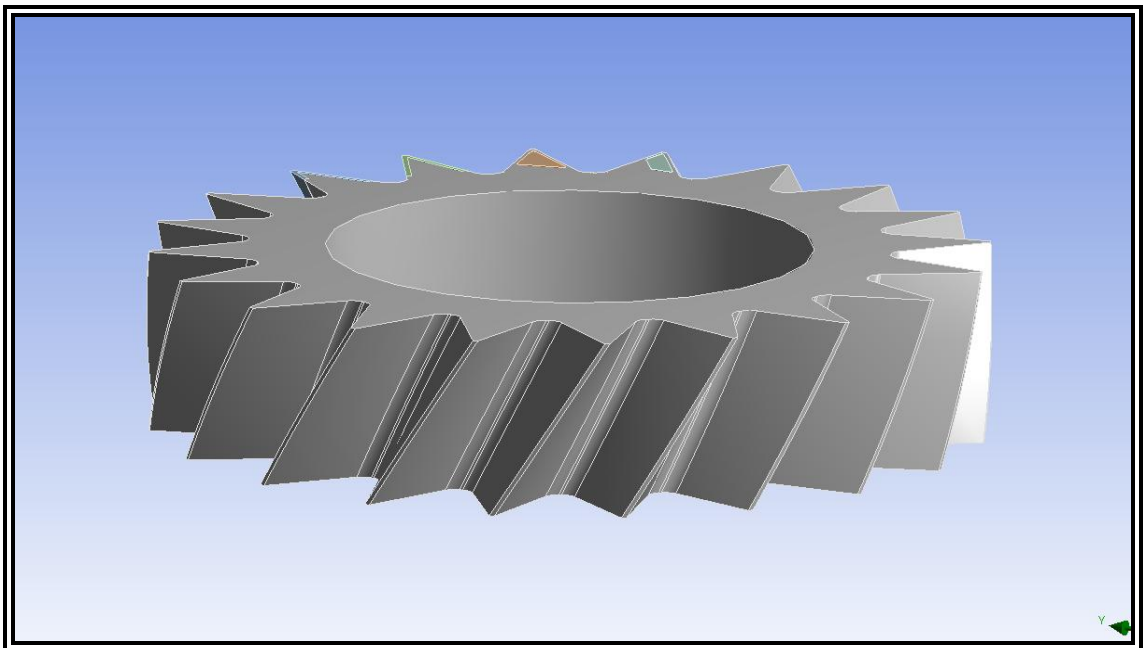


Рисунок 4.4 - Варианты геометрии вооружения

1 - прямозубое вооружение; 2 - косозубое вооружение

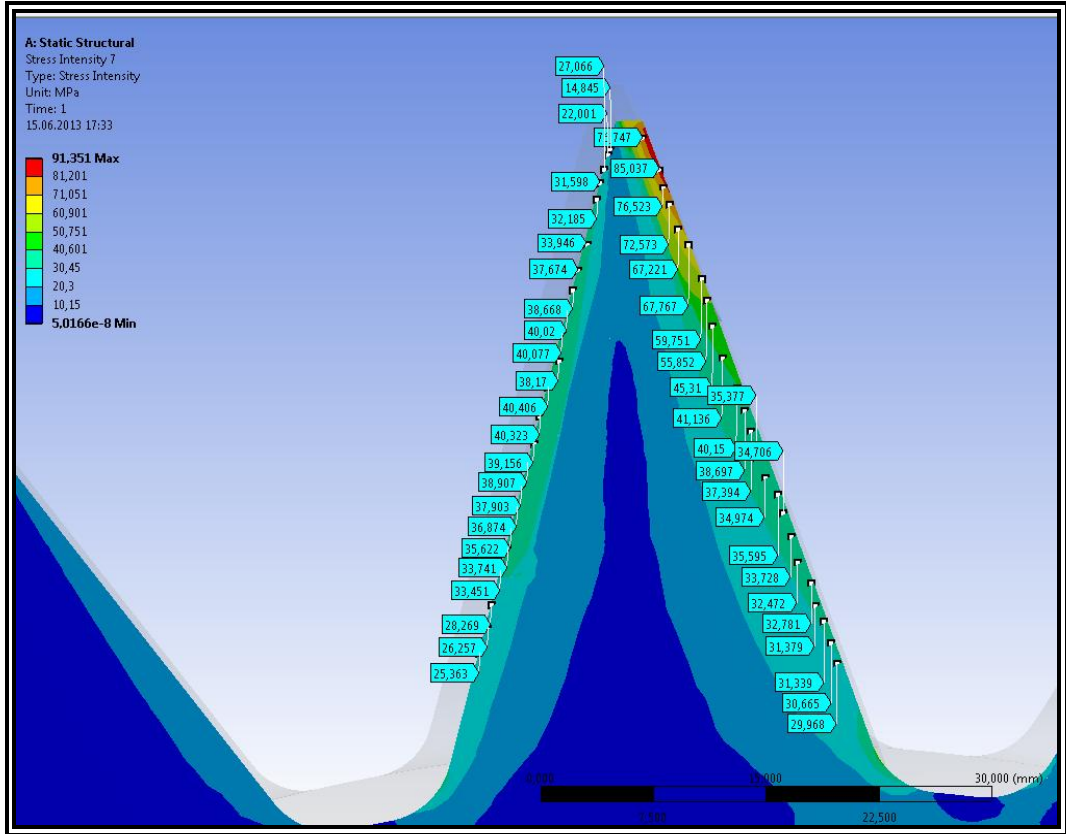


Рисунок 4.5 - Интенсивность напряжений в ПЗВ

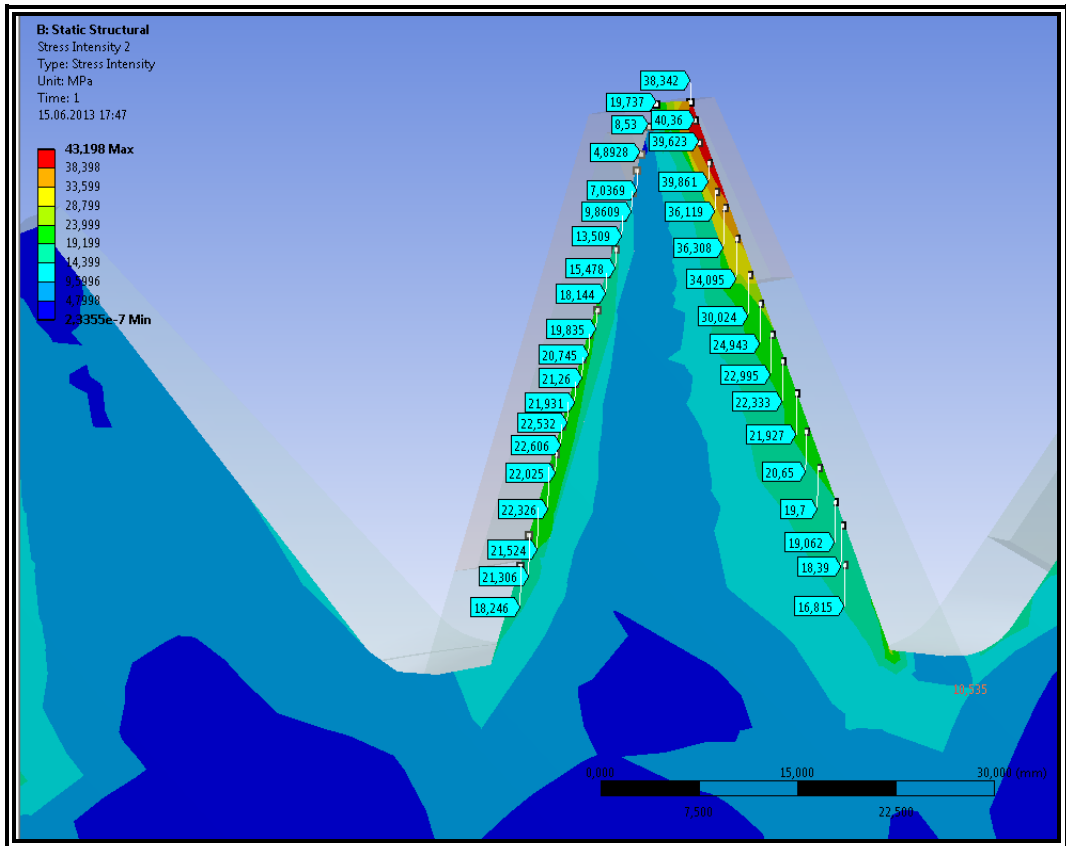


Рисунок 4.6 - Интенсивность напряжений в КЗВ

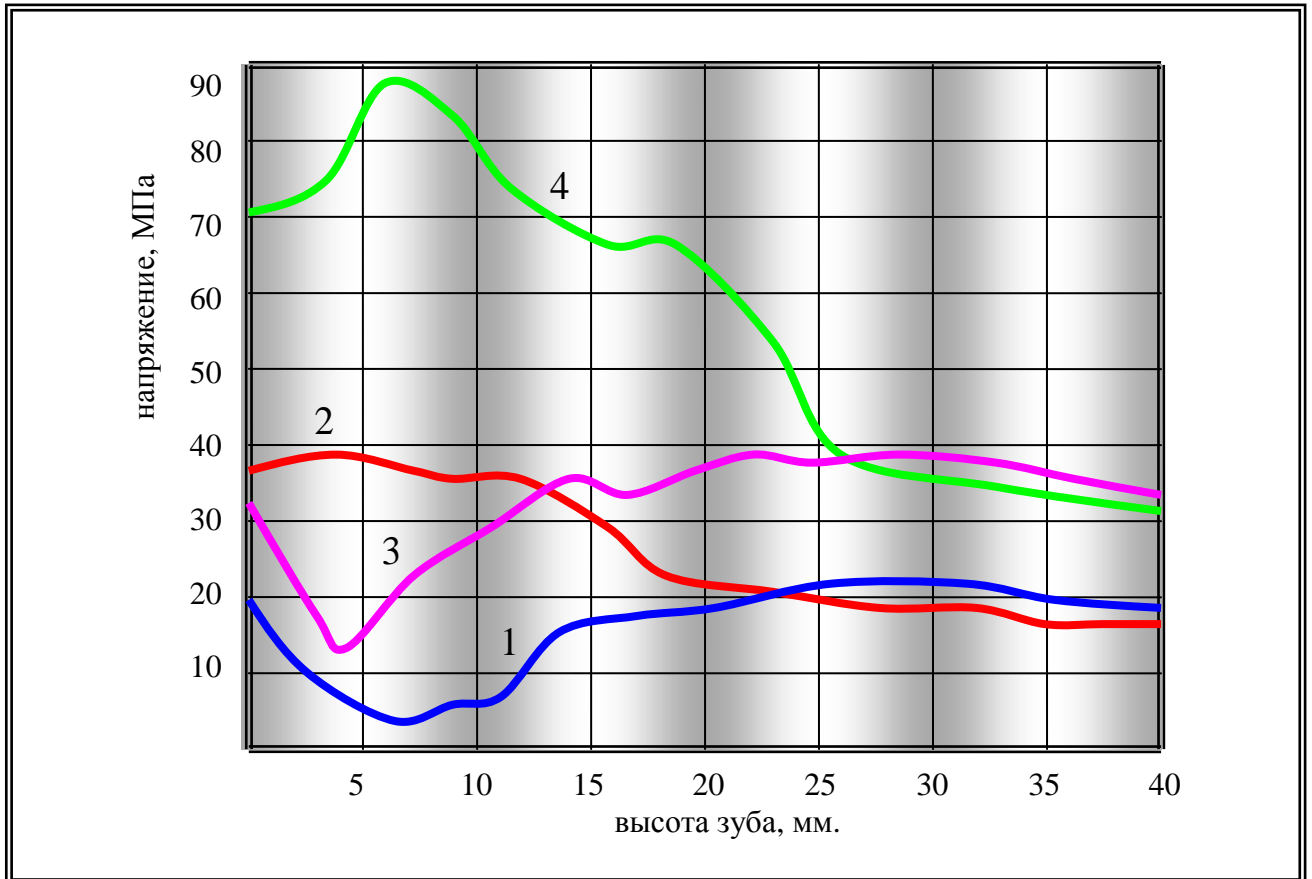


Рисунок 4.7 - Зависимости распределения напряжений по высоте зуба  
 1 – КЗВ набегающая грань; 2 – КЗВ сбегающая грань; 3 – ПЗВ набегающая грань;  
 4 – ПЗВ сбегающая грань

#### 4.3 Исследование напряженного состояния центробежно-объемно-армированного косозубого вооружения ведущих венцов шарошечного бурового инструмента

В процессе бурения пород средней твердости ШБИ его вооружение испытывает значительные знакопеременные динамические нагрузки. Оснащение шарошек стальным ПАЗВ, не обладающим высокой ударно-усталостной прочностью [103], не позволяет обеспечить требуемую долговечность вооружения ШБИ, так как в процессе его работы нередко происходят сколы и отслаивания значительных площадей наплавленного износостойкого материала с рабочих поверхностей зубьев, что неминуемо ведет к повышенному износу зубчатого вооружения ШБИ. Поэтому при бурении пород данной категории предпочтительно использовать центробежно-объемно-армированное зубчатое вооружение (ЦОАЗВ).

Главным преимуществом ЦОАЗВ над ПАЗВ, является наличие армированных зон не только на рабочих поверхностях зубьев, но и по значительному внутреннему объему вооружения, с возможностью варьирования конфигурацией армированной зоны (рисунок 4.8).



Важным этапом при проектировании ШБИ с ЦОАЗВ является осуществление расчета его геометрических характеристик на основе различных показателей прочности. Наиболее удобной процедурой расчета ЦОАЗВ ШБИ, изготавливаемого из разных материалов (сталь и твердый сплав), при незначительных деформациях, является МКЭ, подробно описанный в пункте 4.2. На (рисунок 4.9) представлена конечно-элементная модель косозубого ЦОАЗВ.

Как отмечалось ранее, ШД ударно-режущего действия, созданные для разбуривания пород средней твердости, характеризуются наличием минимального скольжения зубьев вооружения при перемещении шарошек по поверхности забоя, а также при образовании стенки скважины. Они оснащаются шарошками с многоконусным профилем, при этом оси вращения шарошек либо пересекаются, либо незначительно смещены относительно оси ШД. Зубчатое вооружение изготавливается самоочищающимся [103]. С точки зрения механики разрушения упруго-пластичных горных пород долота этой группы должны осуществлять ударно-режущее воздействие зубьев вооружения ШБИ на породу забоя.

Однако ведущие венцы каждой из шарошек данного типа бурового инструмента работают без проскальзывания вооружения.

Рассмотрим один из наиболее распространенных вариантов нагружения зубьев непроскальзывающего вооружения шарошек, т.е. когда два соседних зуба опираются на забой под одинаковыми углами наклона (рисунок 4.8). В данном случае вертикальная нагрузка  $\vec{Q}$ , прикладываемая к ведущему венцу вооружения ШБИ, будет распределяться равномерно между двумя смежными зубьями, при воздействии которых на поверхность забоя на них будут действовать обратные по направлению и равные по величине силы реакции забоя  $\vec{R}$ . Вследствие наклона зубьев вооружения по отношению к забою на угол, равный  $90^\circ - \frac{\beta}{2}$ , каждая из сил реакции породы будет иметь свою тангенциальную составляющую  $\vec{R}_r$ .

Проведем исследование напряжений, возникающих в косозубом ЦОАЗВ, вследствие воздействия на них сил реакции породы забоя. Для начала выявим наиболее опасно-нагруженное сечение КЗВ по ширине зубчатого венца. Поле распределения напряжений по ширине наклонного зуба показано на (рисунок 4.10). Анализ результата расчета, представленного в графическом формате на (рисунок 4.11), свидетельствует о том, что работа КЗВ сопровождается возникновением максимальных напряжений в привершинной области зуба, граничащей с одной из его торцевых поверхностей, т. е. наличием краевого эффекта. В связи с тем, что КЗВ имеет винтообразный профиль, самая нижняя точка винтовой линии зуба нагружена существенно больше, чем самая верхняя.

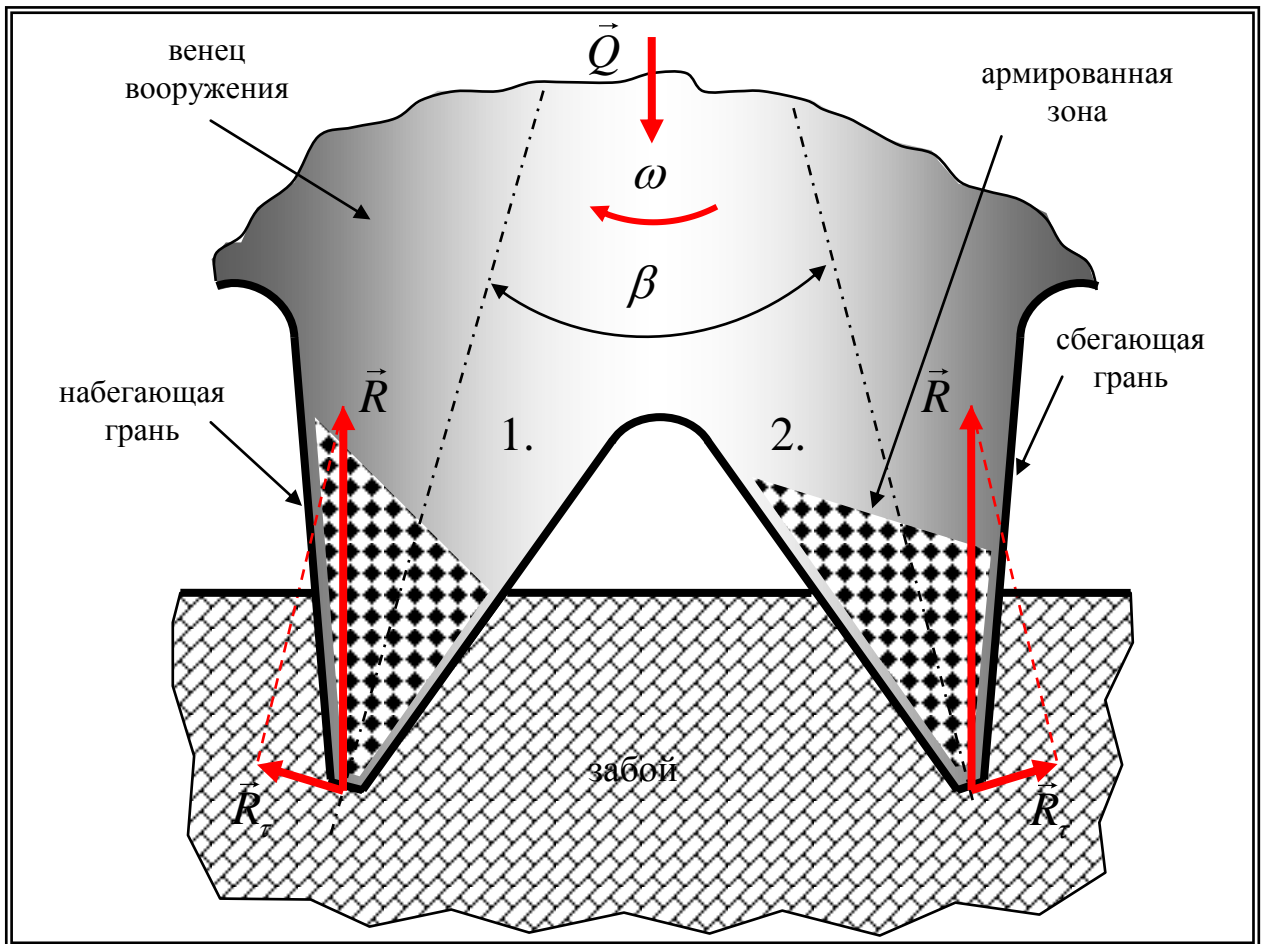


Рисунок 4.8 - Схема нагружения зубьев вооружения

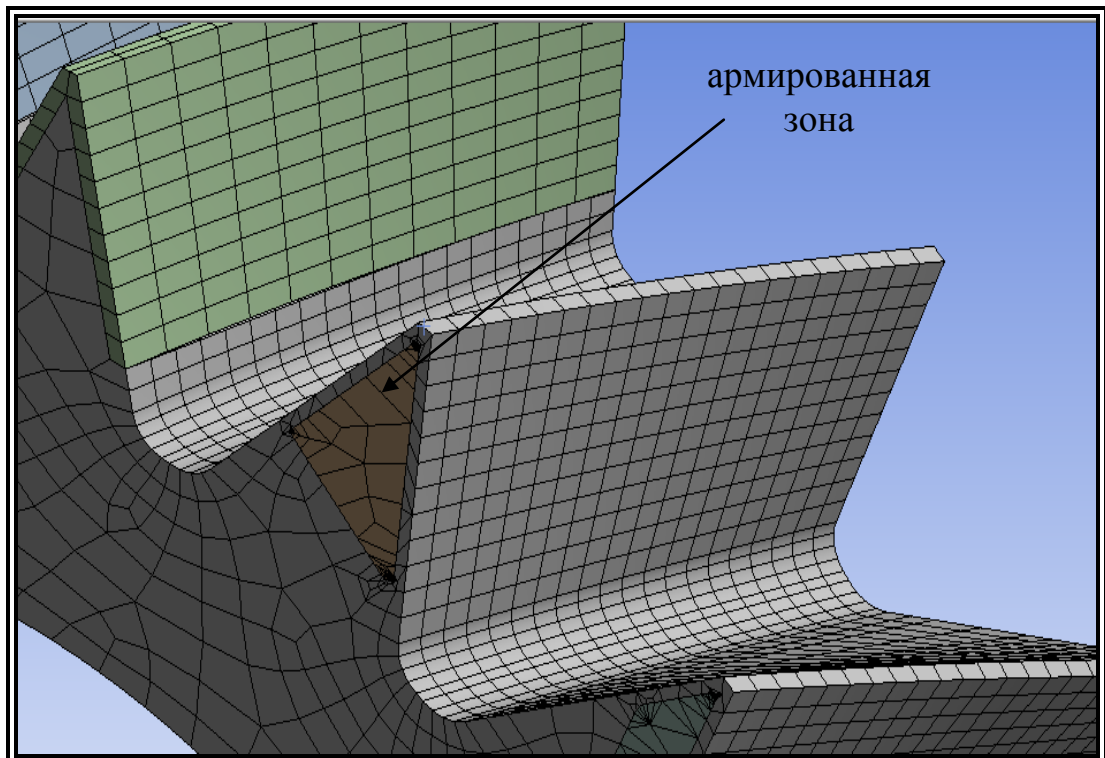


Рисунок 4.9 - Конечно-элементная модель косозубого ЦОЗВ

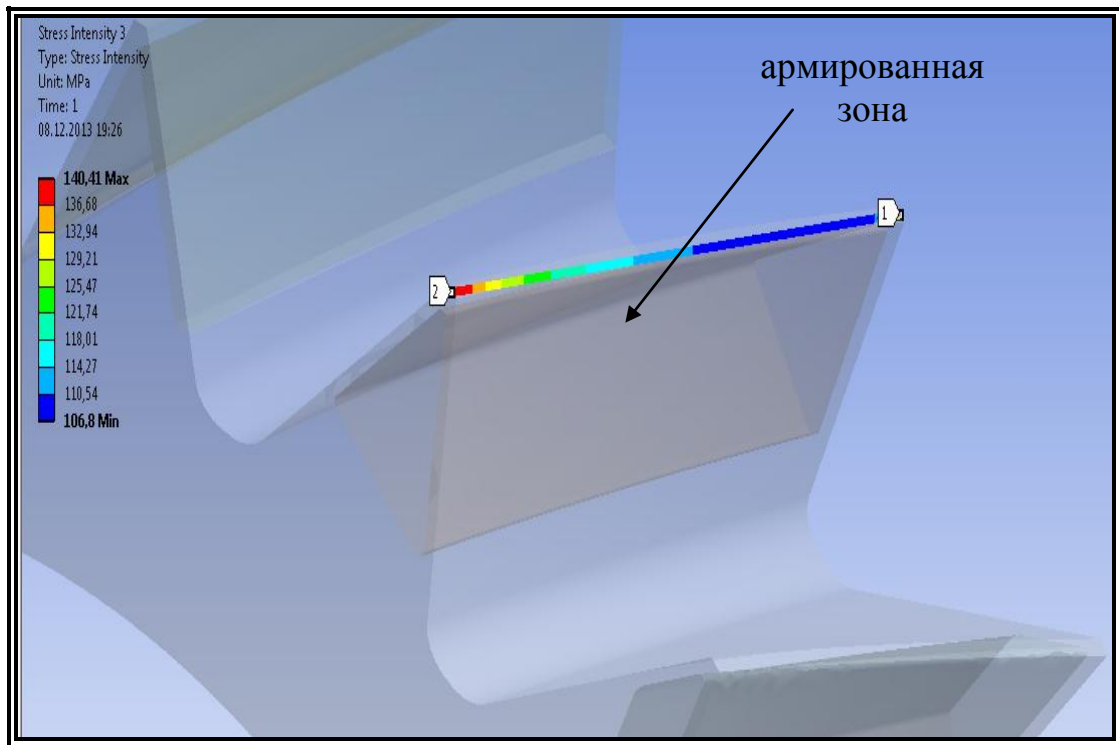


Рисунок 4.10 - Поле распределения напряжений по ширине зуба КЗВ

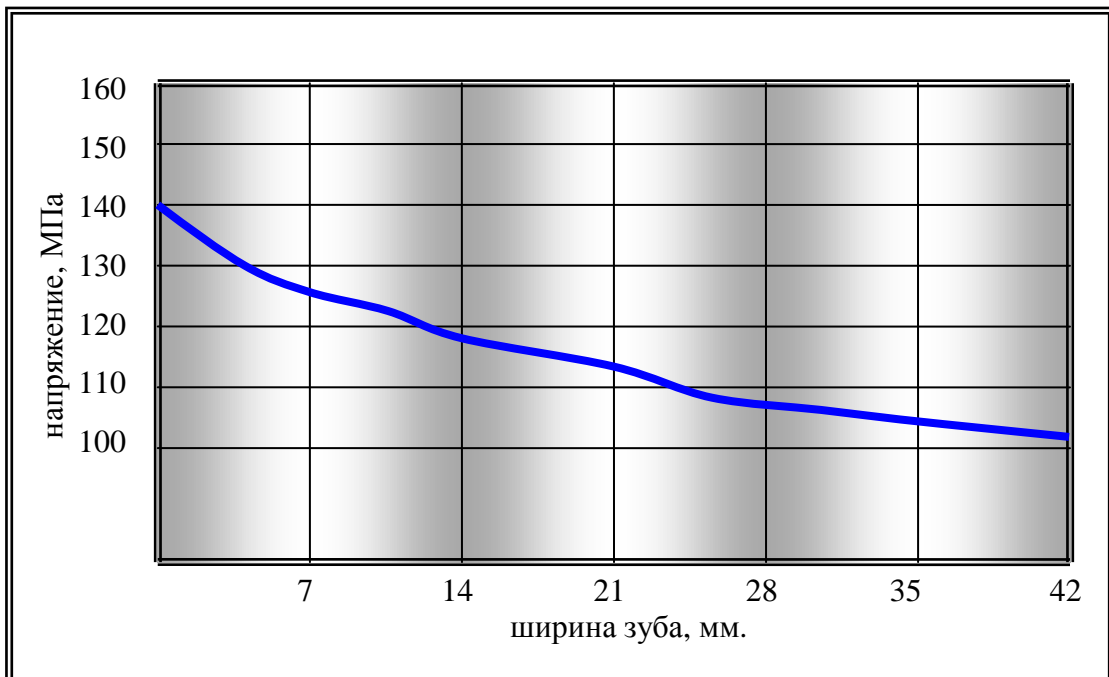


Рисунок 4.11 - Зависимость распределения напряжений по ширине зуба

Выявив опасное сечение по ширине зуба, где зафиксировано возникновение максимального напряжения, далее изучим это сечение с точки зрения распределения напряжений по его высоте. Поля распределения напряжений в первом зубе по его высоте представлены на (рисунок 4.12). Распределение напряжений в центральной части и по основным рабочим поверхностям зуба на (рисунок 4.12.1), а по периметру армированной зоны (рисунок 4.12.2). Поля распределения напряжений во втором зубе по его высоте представлены на (рисунок 4.13). Распределение напряжений в центральной части и основным рабочим поверхностям зуба на (рисунок 4.13.1), а по периметру армированной зоны (рисунок 4.13.2).

На (рисунок 4.14) в графическом формате представлены результаты проведенных расчетов. Полученные результаты наглядно свидетельствуют о том, что для распределения напряжений, возникающих вследствие приложения нагрузки, в первом и втором зубьях КЗВ, характерна одна и та же закономерность. Максимальные значения напряжений наблюдаются в привершинной области, на поверхностях либо набегающей грани 1-го, либо сбегаящей 2-го зубьев вооружения. Наиболее плавное изменение напряжений происходит в центральной области и по средней линии угла заострения зуба. Тем не менее, существуют и некоторые отличия в напряженно-деформируемом состоянии 1-го и 2-го зубьев КЗВ, очевидно связанные с различной ориентацией армированной зоны по отношению к направлению действия сил реакции забоя. Однако данное утверждение требует проведения отдельного исследования.

Напряженно-деформируемые состояния армированных зон первого и второго зубьев также имеет существенные отличия. Так, для 1-го зуба установлено, что напряжения, возникающие в центробежно-объемно-армированном материале, превосходят напряжения в стальной основе зубчатого вооружения, исключительно в вершинной части сбегаящей грани зуба. Для 2-го зуба напряжения, возникающие в центробежно-объемно-армированном материале, превосходят напряжения в стальной основе вооружения в средней области зуба, причем как со стороны сбегаящей, так и набегающей граней зуба. При этом для обоих зубьев характерна одна и та же закономерность, максимальные величины напряжений в зоне центробежно-объемно-армированного материала, зафиксированы в вершинной части зубьев, с плавным снижением этих величин в направлении к основанию зубьев.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что работа ведущих венцов центробежно-объемно-армированного КЗВ при бурении средних пород характеризуется неравномерностью распределения нагрузки между смежными зубьями КЗВ, одновременно разрушающими забой. При этом НДС зубьев ЦОАЗВ характеризуется следующей зависимостью: наибольшие напряжения возникают в вершинной части зуба с противоположной стороны углу его наклона по отношению к поверхности забоя и постепенно и плавно уменьшаются в направлении основания зуба.

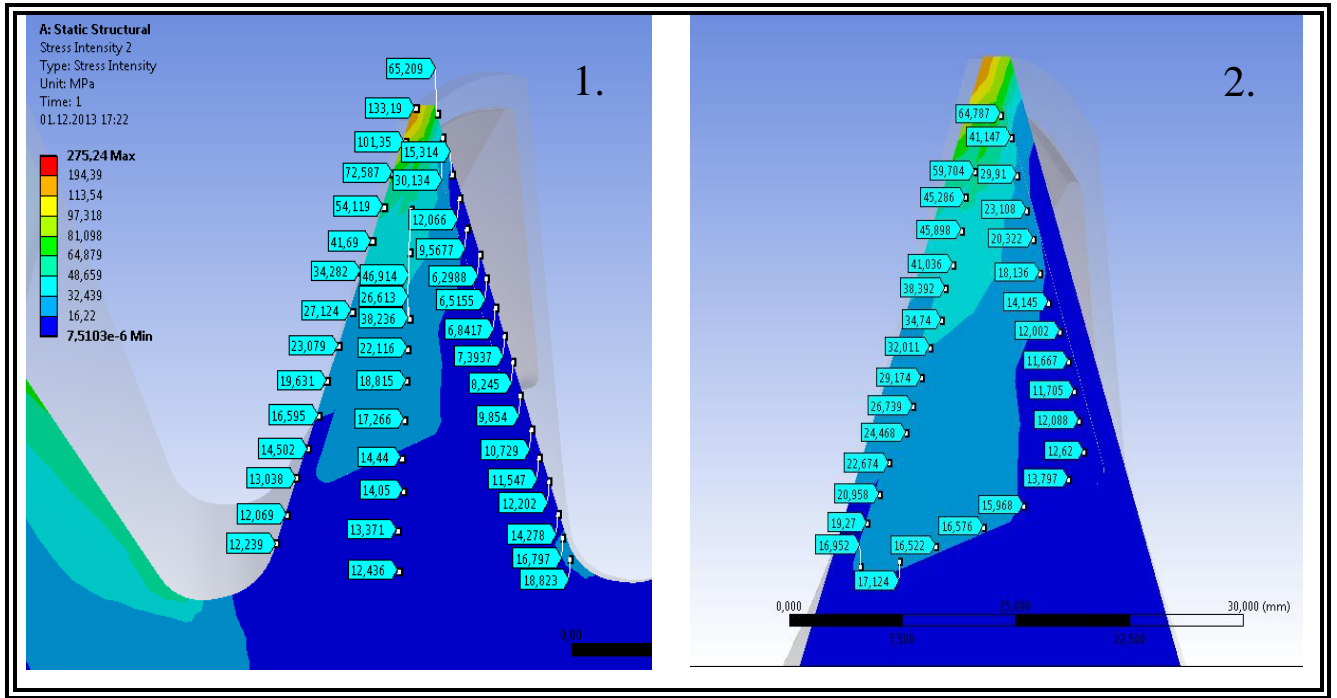


Рисунок 4.12 - Распределение напряжений по высоте первого зуба

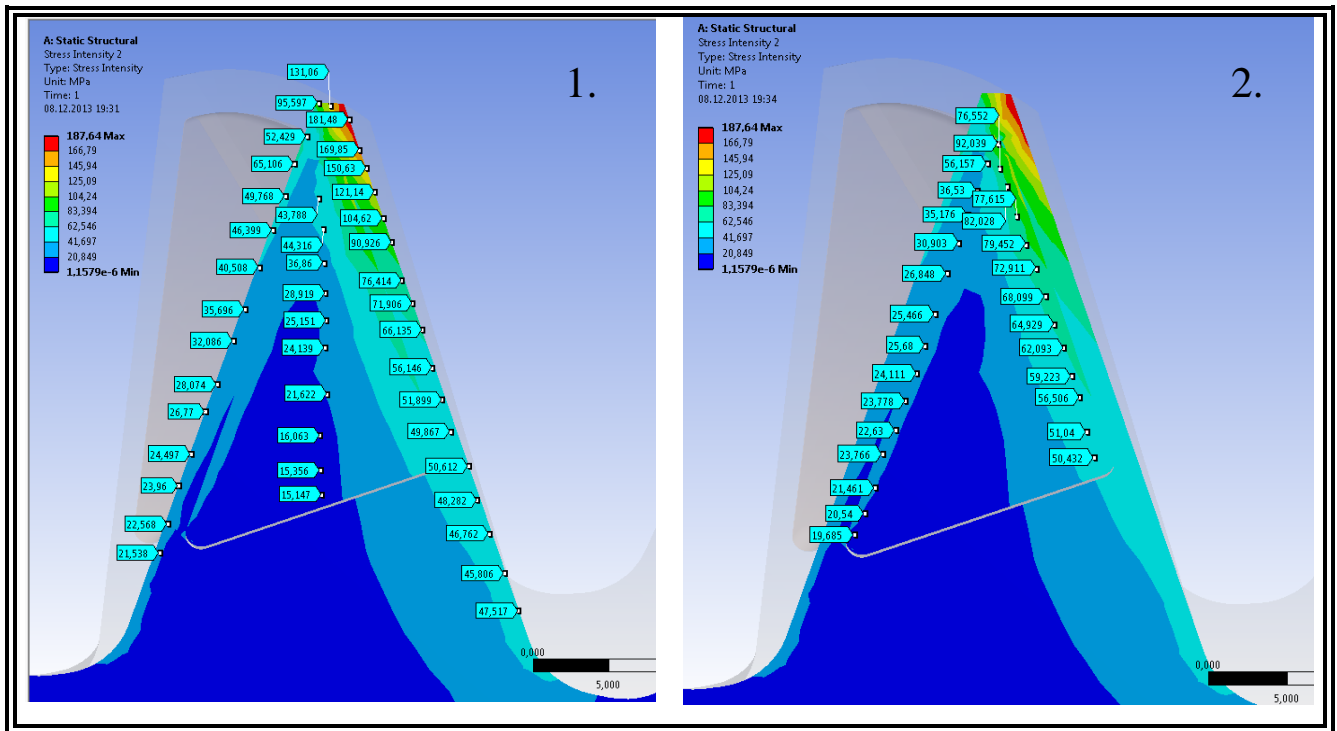


Рисунок 4.13 - Распределение напряжений по высоте второго зуба

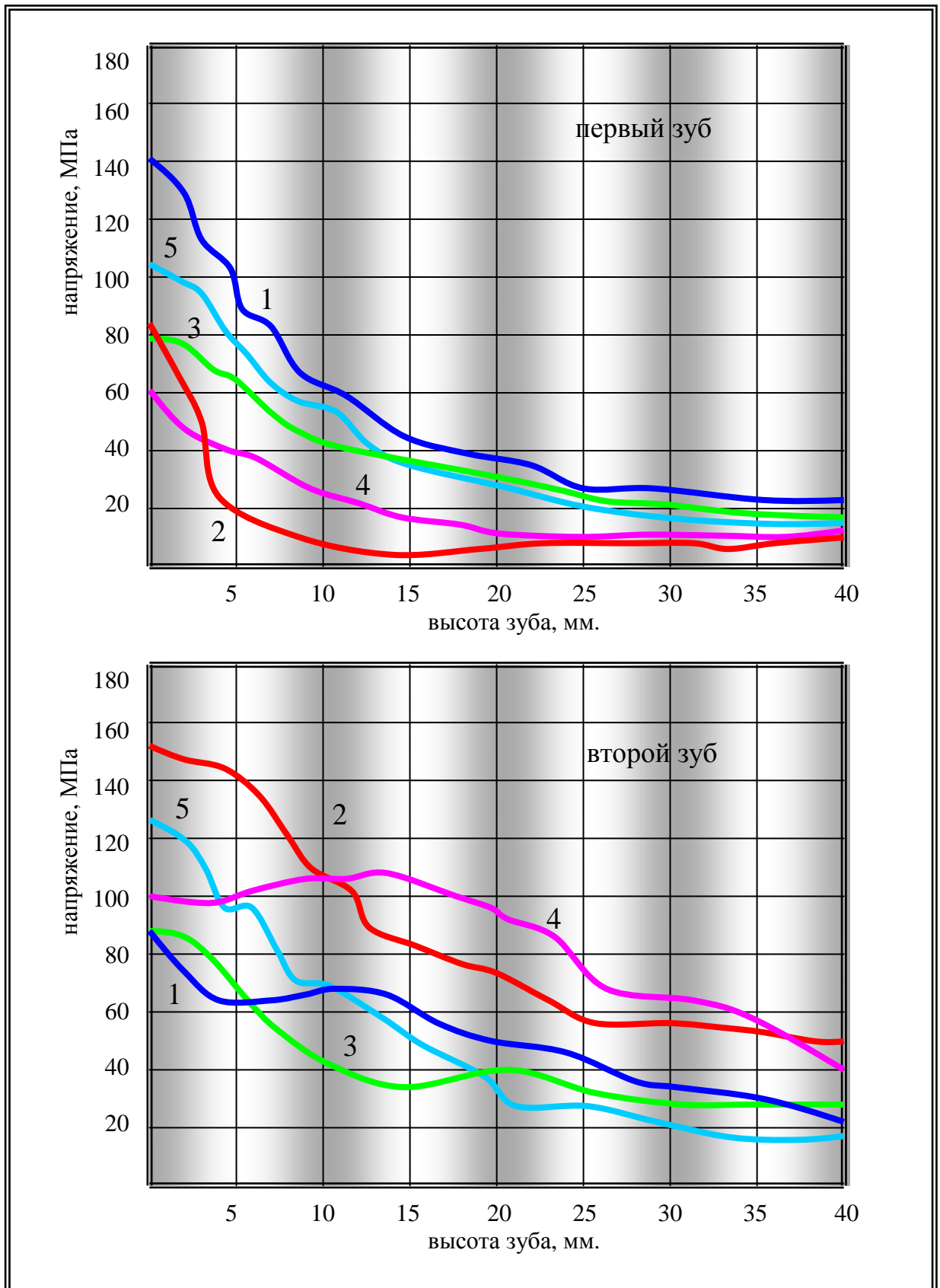


Рисунок 4.14 - Зависимости распределения напряжений по высоте зуба

1 - грань набегающая; 2 - грань сбегающая; 3 - армированная область со стороны грани набегающей; 4 - армированная область со стороны грани сбегающей; 5 - зона центральная

#### 4.4 Методика расчета максимальных изгибающих нагрузок, действующих на вооружение ведомых венцов в процессе работы шарошечного бурового инструмента

Проектирование геометрии ЦОАЗВ ведомых венцов ШБИ требует знания величин и направлений воздействия на его зубья максимально возможных нагрузок, возникающих при работе инструмента в штатных условиях бурения. Рассмотрим на примере центробежно-объемно-армированного зубчатого вооружения работу ведомого венца, работающего с пробуксовкой вооружения по забою.

Как известно, ЦОАЗВ обладает более высокой стойкостью к разнонаправленным динамическим нагрузкам в сравнении с поверхностно-армированным. В связи с этим данный тип вооружения наилучшим образом подходит для оснащения шарошечного бурового инструмента больших диаметральных размеров, зубья вооружения которого имеют значительные вылеты над поверхностью шарошек, вследствие чего воспринимают гораздо большие знакопеременные изгибающие нагрузки в процессе работы инструмента.

В связи с этим одним из важных моментов при проектировании и разработке данного типа вооружения является расчет геометрических параметров зубьев на основе допускаемых напряжений при изгибе. Расчет геометрии центробежно-объемно-армированного зубчатого вооружения следует осуществлять с обязательным учетом физико-механических характеристик армированного слоя, а также эксплуатационных параметров (осевая нагрузка на инструмент, скорость вращения инструмента и т. д.) бурения ШБИ.

В связи с этим вначале определим максимальные изгибающие нагрузки, действующие на зубья центробежно-объемно-армированного вооружения ведомых венцов, работающих в условиях пробуксовки, ШБИ [114]. Как было установлено ранее, зубчатое вооружение ведомых венцов имеет более сложную траекторию движения, нежели вооружение ведущего венца. Анализ основных сил, действующих на зубчатое вооружение ШБИ, в тот момент времени, когда шарошка воздействует на забой 2-мя соседними зубьями, показал, что в этом случае результирующая сила реакции забоя на набегающий зуб вооружения будет складываться из суммы динамической и статической составляющих (рисунок 4.15). Сила реакции забоя, действующая на набегающий зуб вооружения шарошки, определяется как

$$R = N + P_D + F_C^1, \quad (4.22)$$

где  $F_C^1$  – усилие на зуб, связанное с его проскальзыванием по забою, Н.

Это объясняется тем, что при переходе вторым зубом точки  $B$  по траектории движения в сторону точки  $C$ , большая часть вертикальной нагрузки переносится на 1-й зуб вооружения. В то время как второй зуб участвует в разрушении породы, в основном под действием

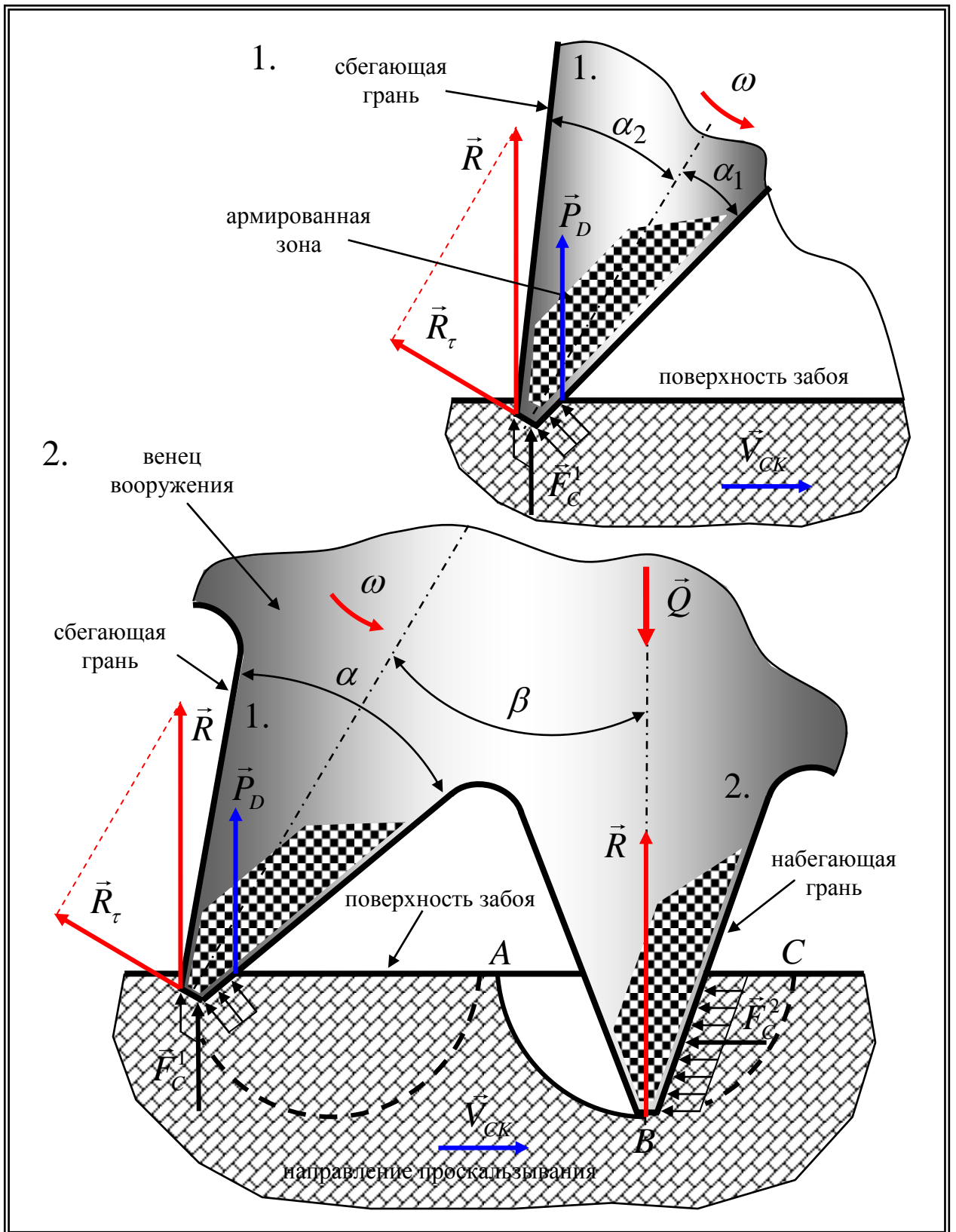


Рисунок 4.15 - Схема нагружения центробежно-объемно-армированных зубьев при пробуксовке вооружения

1 - асимметричный зуб; 2 - симметричный зуб



крутящего момента. Учитывая соотношения: (4.2), (4.3), (4.4) и (4.5) пункта 4.1, общее усилие на зубчатый элемент определится как

$$R = N \left[ 1 + \frac{\pi^2 R_{III} n_{III}^2 \cos \gamma}{3600g} \right] + F_C^1. \quad (4.23)$$

Тогда изгибающая составляющая общего усилия будет равна:

$$R_r = \left[ N \left( 1 + \frac{\pi^2 R_{III} n_{III}^2 \cos \gamma}{3600g} \right) + F_C^1 \right] \sin \beta. \quad (4.24)$$

После определения максимальной изгибающей нагрузки, действующей на зуб ведомого венца вооружения ШБИ, переходим к непосредственному осуществлению расчетов вооружения на прочность по допускаемым напряжениям при изгибе. В качестве примера проведем расчет напряжений, возникающих в асимметричных и симметричных зубьях ведомого венца вооружения ШБИ, при воздействиях максимальных нагрузок, по методике, описанной в (пункте 4.2). На (рисунок 4.16) в графическом формате представлены результаты расчетов напряжений для различных точек зубчатого вооружения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что максимальные напряжения, причем для обеих форм зубчатого вооружения, возникают в вершинной части зубьев со стороны их сбегающих граней. При этом распределения напряжений в зубьях по высоте как в армированной так и зоне основного металла, для обоих вариантов одинаковы, и характеризуются, тем, что максимальные значения напряжений достигаются в верхней части зубьев с дальнейшим плавным снижением к их основанию. При этом величина перепада напряжений и величины самих напряжений в армированной зоне меньше, чем в стальной основе зубьев.

Главным свидетельством преимущества использования асимметричного вооружения в этих условиях разрушения горной породы на забое является тот факт, что напряжения, возникающие в зубе асимметричной формы по максимальным и средним значениям, существенно меньше, чем на аналогичных участках симметричного вооружения. Это особенно актуально для армированной зоны, в связи с тем, что ее стойкость к воздействию знакопеременных динамических нагрузок значительно ниже, чем у стальной основы ЦОАЗВ.

Таким образом, применение асимметричного зубчатого вооружения для оснащения ведомых венцов шарошек, с одновременным упрочнением зубьев ШБИ центробежно-объемно-армированным композиционным материалом слоем под набегающей гранью, дает возможность существенно уменьшить как средние, так и максимальные напряжения, которые возникают в зубьях вооружения в процессе работы ШБИ. В свою очередь, меньшая нагруженность армированной зоны, которая в значительной степени и определяет долговечность зубчатого вооружения, даст возможность повысить и эффективность работы ШБИ в целом.

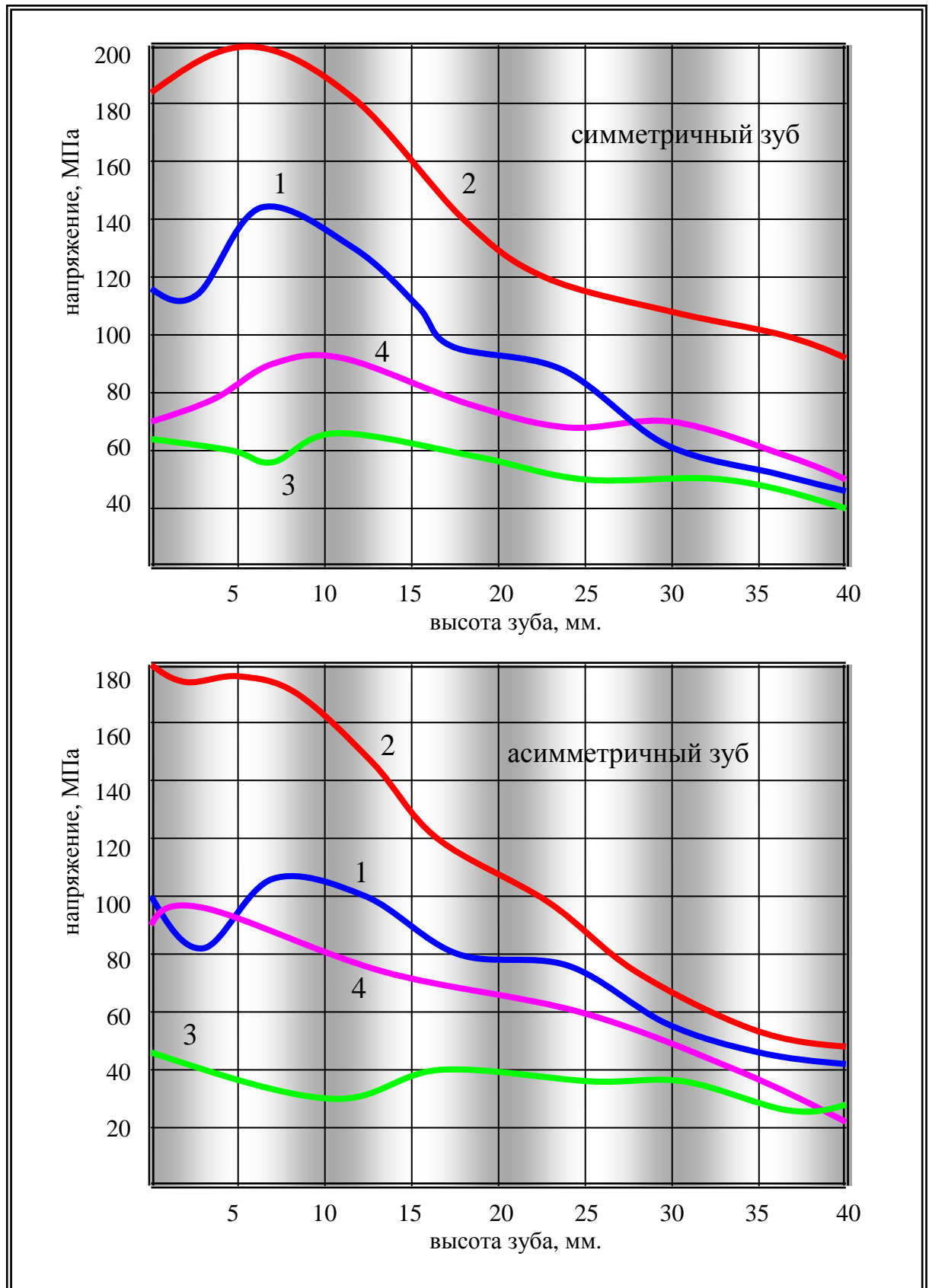


Рисунок 4.16 - Зависимости распределения напряжений по высоте зуба

1 - грань набегающая; 2 - грань сбегающая; 3 - армированная область со стороны грани набегающей; 4 - армированная область со стороны грани сбегающей

#### 4.5 Сравнительный анализ напряженного состояния симметричных и асимметричных зубьев центробежно-объемно-армированного косозубого вооружения ведомых венцов шарошечного бурового инструмента

Важным направлением повышения эффективности работы шарошечных буровых долот является дальнейшее совершенствование их вооружения. Создание новых конструкций вооружения ШБИ как за счет технологических, так и конструктивных решений позволяет в значительной степени повысить производительность буровых работ.

В этой связи, использование метода центробежного объемного армирования при изготовлении вооружения бурового инструмента позволяет создавать самую сложную геометрию вооружения, с одновременным ее объемным армированием высокоизносостойкими материалами [93].

Совершенствование геометрии вооружения невозможно без учета условий работы бурового инструмента, а также детального анализа напряжений, возникающих вследствие этих условий, во всех элементах вооружения.

Таким образом, при проектировании и разработке бурового инструмента важным этапом является расчет геометрических параметров вооружения с точки зрения разных показателей прочности. Один из таких показателей - анализ статической прочности породоразрушающих элементов вооружения.

Рассмотрим процесс взаимодействия вооружения шарошек ШБИ с поверхностью забоя при разбурировании средних и мягких пород. Шарошечные долота, созданные для бурения пород данных категорий, относятся к инструменту ударно-режущего воздействия, то есть их работа сопровождается не только ударным воздействием зубчатого вооружения на породу, но и одновременным проскальзыванием зубьев при перемещении шарошек по поверхности забоя.

Одним из способов повышения разрушающей способности вооружения долот данного типа является увеличение угла атаки передней, по отношению к направлению проскальзывания грани зубьев вооружения, т. е. когда  $\psi_{1;2}^a < \psi_{1;2}^{ac}$  [113]. Это может достигаться различными способами, однако самым простым как по технологии изготовления, так и по конструкции является придание зубьям вооружения асимметричной формы, т. е. когда выполняется условие  $\alpha_1 < \alpha_2$ , (рисунок 4.17.2).

На (рисунок 4.17) представлена схема нагружения зубчатого вооружения шарошки в тот момент, когда два ее смежных зуба одновременно воздействуют на породу. В этих условиях зубья подвергаются максимальному воздействию изгибающей нагрузки, которая является

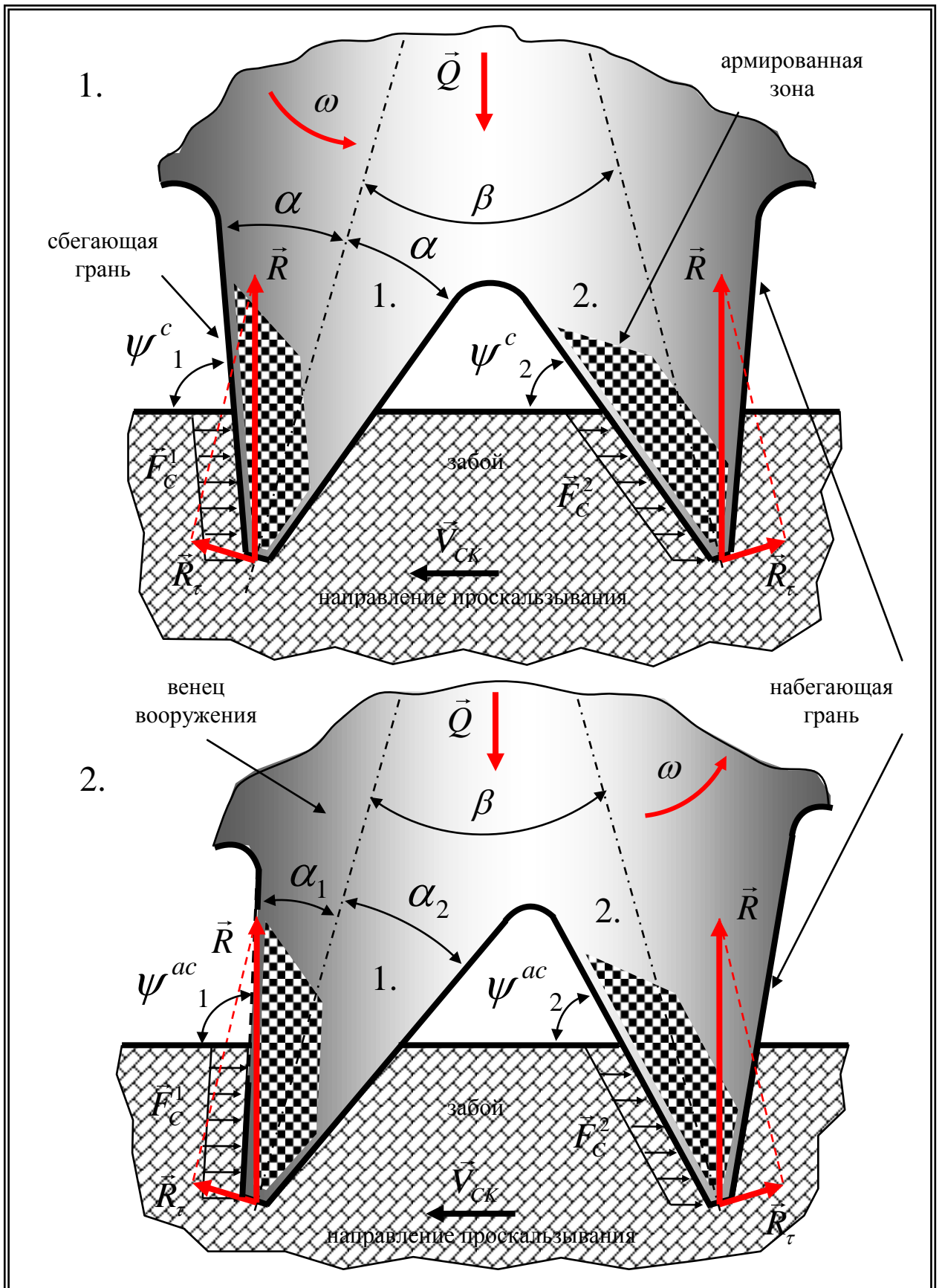


Рисунок 4.17 - Схема нагружения центробежно-объемно-армированных зубьев

при подтормаживании вооружения:

1 - симметричные зубья; 2 - асимметричные зубья

одной из основных причин развития процесса трещинообразования как в армирующем износостойком материале, так и в зоне основного металла зуба.

Допустим, что в этом случае вертикальная нагрузка  $\vec{Q}$ , прикладываемая к ведущему венцу вооружения ШБИ, будет распределяться равномерно между двумя смежными зубьями, при воздействии которых на поверхность забоя на них будут действовать обратные по направлению и равные по величине силы реакции забоя  $\vec{R}$ . Вследствие наклона зубьев вооружения по отношению к забою на угол, равный  $90^\circ - \beta/2$ , каждая из сил реакции породы будет иметь свою тангенциальную составляющую  $\vec{R}_\tau$ . В дополнение к этому зубчатое вооружение при проскальзывании в режиме подтормаживания разрушает горную породу забоя в основном сбегаящими гранями зубьев, вследствие чего на эти поверхности дополнительно воздействуют распределенные силы сопротивления разрушаемой породы  $\vec{F}_c^1$  и  $\vec{F}_c^2$ , соответственно (рисунок 4.17). Рассмотрим напряжения, возникающие в зубьях центробежно-объемно-армированного косозубого симметричного и асимметричного вооружения в результате воздействия на него этой суммарной нагрузки.

Для начала выявим наиболее опасно нагруженное сечение КЗВ по ширине зубчатого венца. Поле распределения напряжений по ширине наклонного зуба показано на (рисунок 4.18). Анализ результата расчета, представленного в графическом формате на (рисунок 4.19), свидетельствует о том, что работа КЗВ сопровождается возникновением максимальных напряжений в привершинной области зуба, граничащей с одной из его торцевых поверхностей, то есть наличием краевого эффекта. В связи с тем, что КЗВ имеет винтообразный профиль, самая нижняя точка винтовой линии зуба нагружена существенно больше, чем самая верхняя. Разность напряжений в крайних точках по ширине симметричных зубьев несколько больше, чем этот же параметр для асимметричного зуба. Максимальные напряжения также выше у симметричного вооружения.

Выявив опасное сечение по ширине зуба, где зафиксировано возникновение максимального напряжения, далее изучим это сечение с точки зрения распределения напряжений по его высоте для симметричных и асимметричных зубьев. Поля распределения напряжений в первом симметричном зубе по его высоте представлены на (рисунок 4.20). Распределение напряжений в центральной части и по основным рабочим поверхностям зуба на (рисунок 4.20.1), а по периметру армированной зоны на (рисунок 4.20.2). Поля распределения напряжений в первом асимметричном зубе по его высоте представлены на (рисунок 4.21). Распределение напряжений в центральной части и основным рабочим поверхностям первого асимметричного зуба представлено на (рисунок 4.21.1), а по периметру армированной зоны на (рисунок 4.21.2).

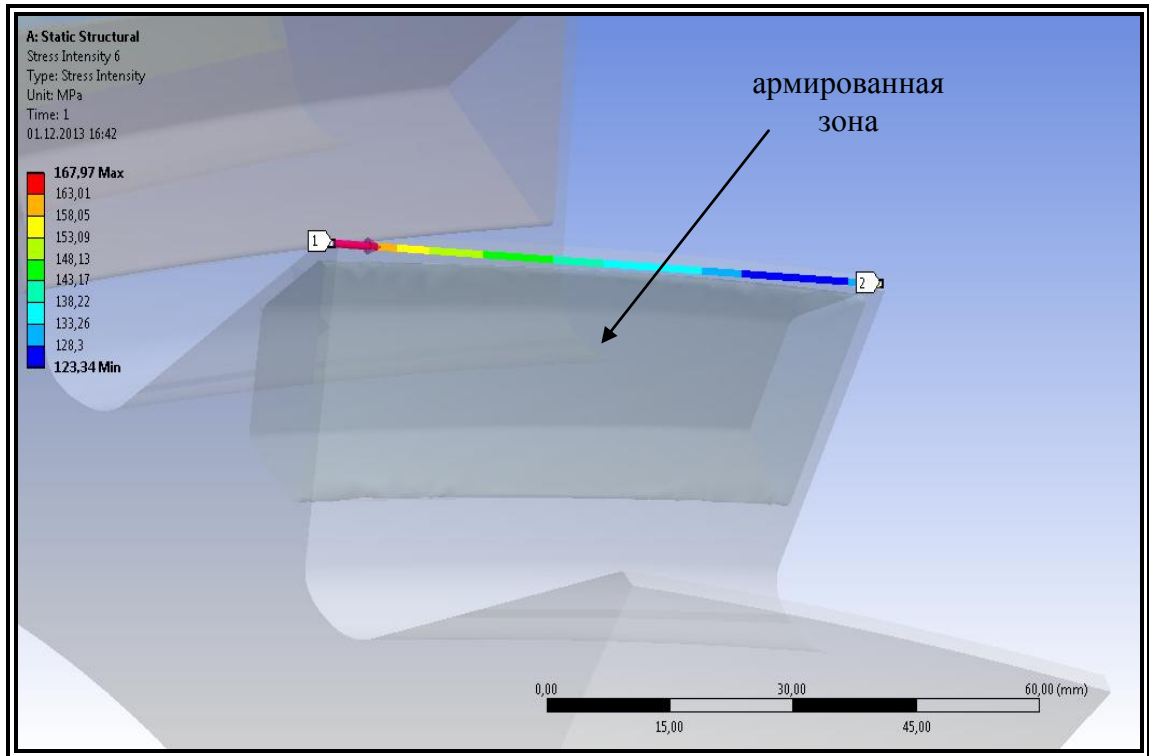


Рисунок 4.18 - Схема для определения распределения напряжений по ширине зуба

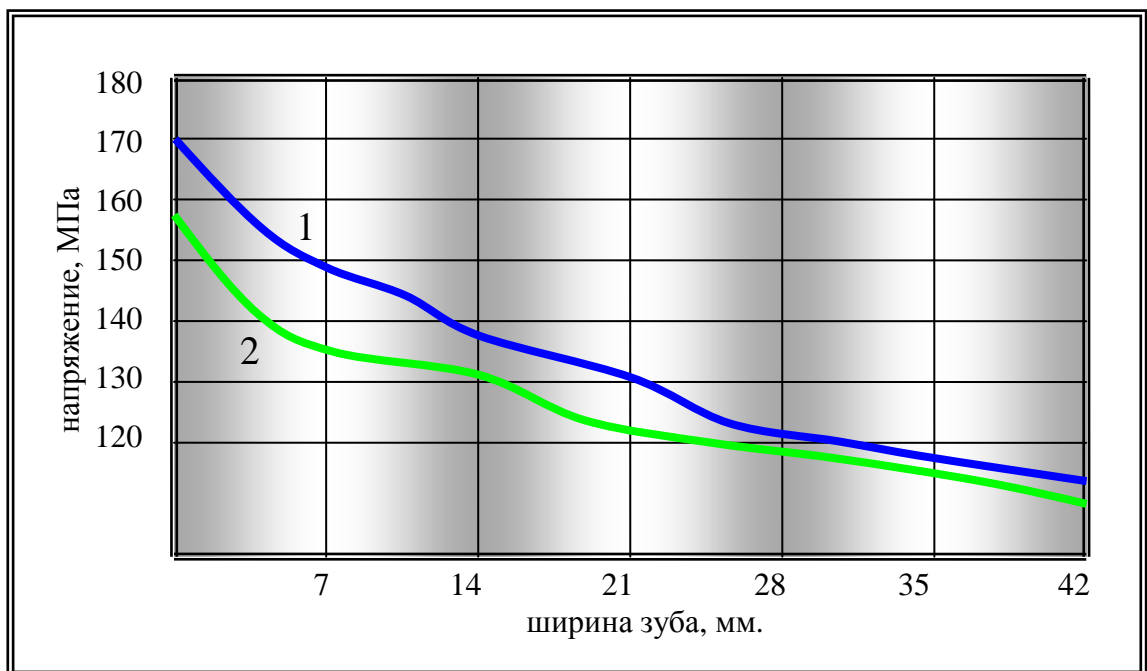


Рисунок 4.19 - Зависимость распределения напряжений по ширине зуба  
 1 - симметричные зубья; 2 - асимметричные зубья

На (рисунок 4.22) в графическом формате представлены результаты проведенных расчетов. Полученные результаты наглядно свидетельствуют о том, что напряженно-деформируемое состояние первого симметричного и асимметричного зубьев вооружения не имеют принципиальных отличий и различаются лишь количественными величинами. Максимальные напряжения в симметричном зубе несколько выше, чем в асимметричном, и возникают в при вершинной зоне со стороны набегающей грани. Та же закономерность наблюдается и в отношении армированной зоны со стороны набегающей грани и в меньшей степени для центральной линии зуба. Напряжения, возникающие на сбегающих гранях и в армированных зонах со стороны тех же граней, в зубьях обеих конфигураций имеют лишь незначительные отличия.

Поля распределения напряжений во втором симметричном зубе по его высоте представлены на (рисунок 4.23). Распределение напряжений в центральной части и по основным рабочим поверхностям зуба показаны на (рисунок 4.23.1), а по периметру армированной зоны на (рисунок 4.23.2). Поля распределения напряжений во втором асимметричном зубе по его высоте представлены на (рисунок 4.24). Распределение напряжений в центральной части и по основным рабочим поверхностям второго асимметричного зуба на (рисунок 4.24.1), а по периметру армированной зоны на (рисунок 4.24.2).

На (рисунок 4.25) в графическом формате представлены результаты проведенных расчетов. Полученные результаты наглядно свидетельствуют о том, что напряженно-деформируемое состояние второго симметричного и асимметричного зубьев вооружения имеют значительные отличия. Если напряжения в симметричном зубе напоминают по величине и распределению напряжения в первом зубе лишь в обратной последовательности, то напряжения, возникающие во втором зубе, асимметричной формы, во-первых, существенно меньше, чем в первом, и, во-вторых, обладают ярко выраженной особенностью, заключающейся в том, что кривые, характеризующие изменение напряжений по поверхностям граней, так и зон армирования, пересекаются в средней части зуба относительно его вылета над поверхностью шарошки.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что работа косозубого симметричного и асимметричного ЦОЗВ характеризуется неравномерностью распределения нагрузки между смежными зубьями КЗВ, одновременно разрушающимися забой. При этом неравномерность нагружения, возникающая в асимметричном вооружении, незначительно выше, а величины напряжений существенно ниже, чем у вооружения оснащенного симметричными зубьями. Напряженно-деформируемое состояние для обоих типов зубьев ЦОЗВ характеризуется следующей зависимостью: наибольшие напряжения возникают в вершинной части зуба с противоположной стороны углу его наклона по отношению к поверхности забоя и постепенно и плавно уменьшаются в направлении основания зуба.

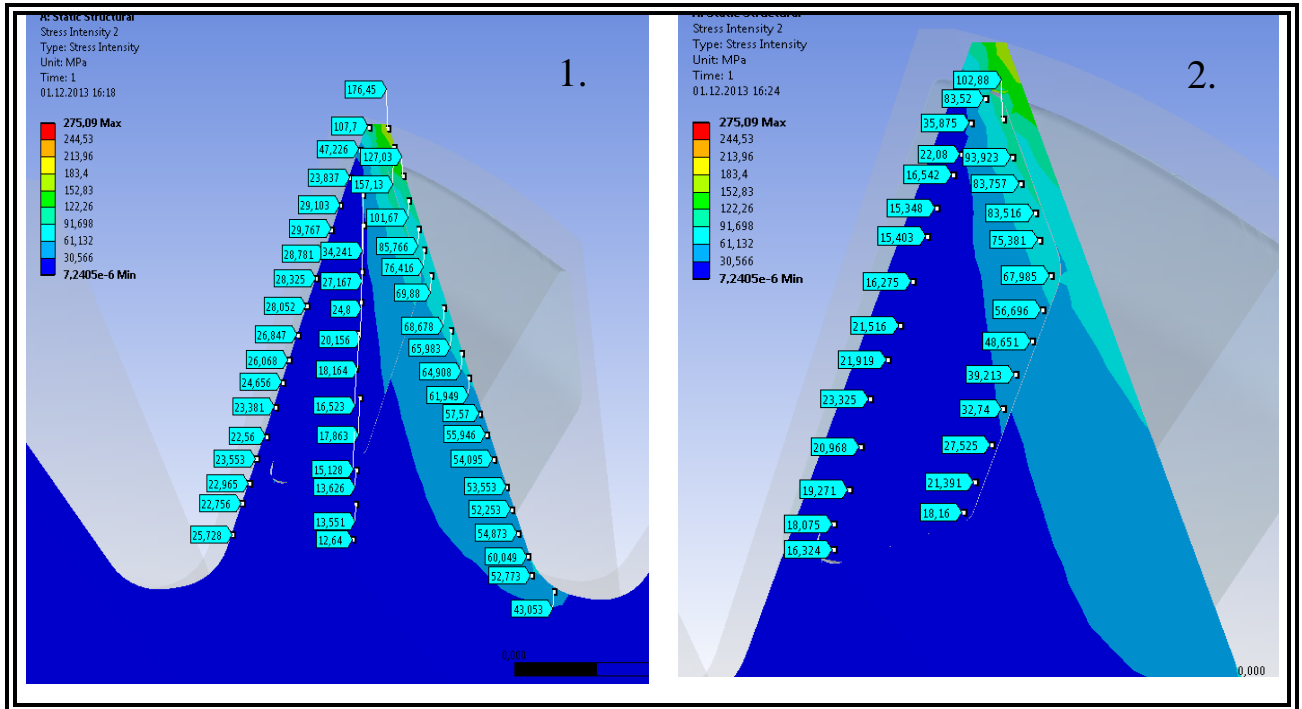


Рисунок 4.20 - Распределение напряжений по высоте первого симметричного зуба  
 1 - по средней части и границам; 2 - по периметру армированной зоны

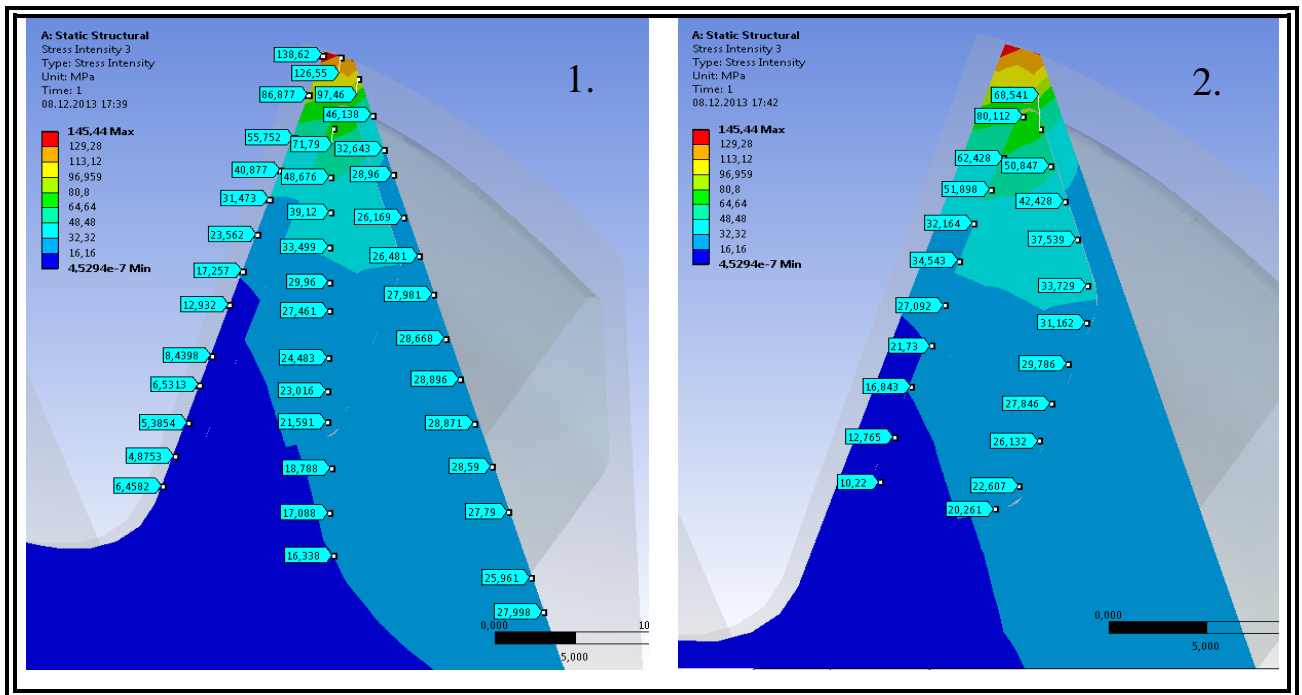


Рисунок 4.21 - Распределение напряжений по высоте первого асимметричного зуба  
 1 - по средней части и границам; 2 - по периметру армированной зоны



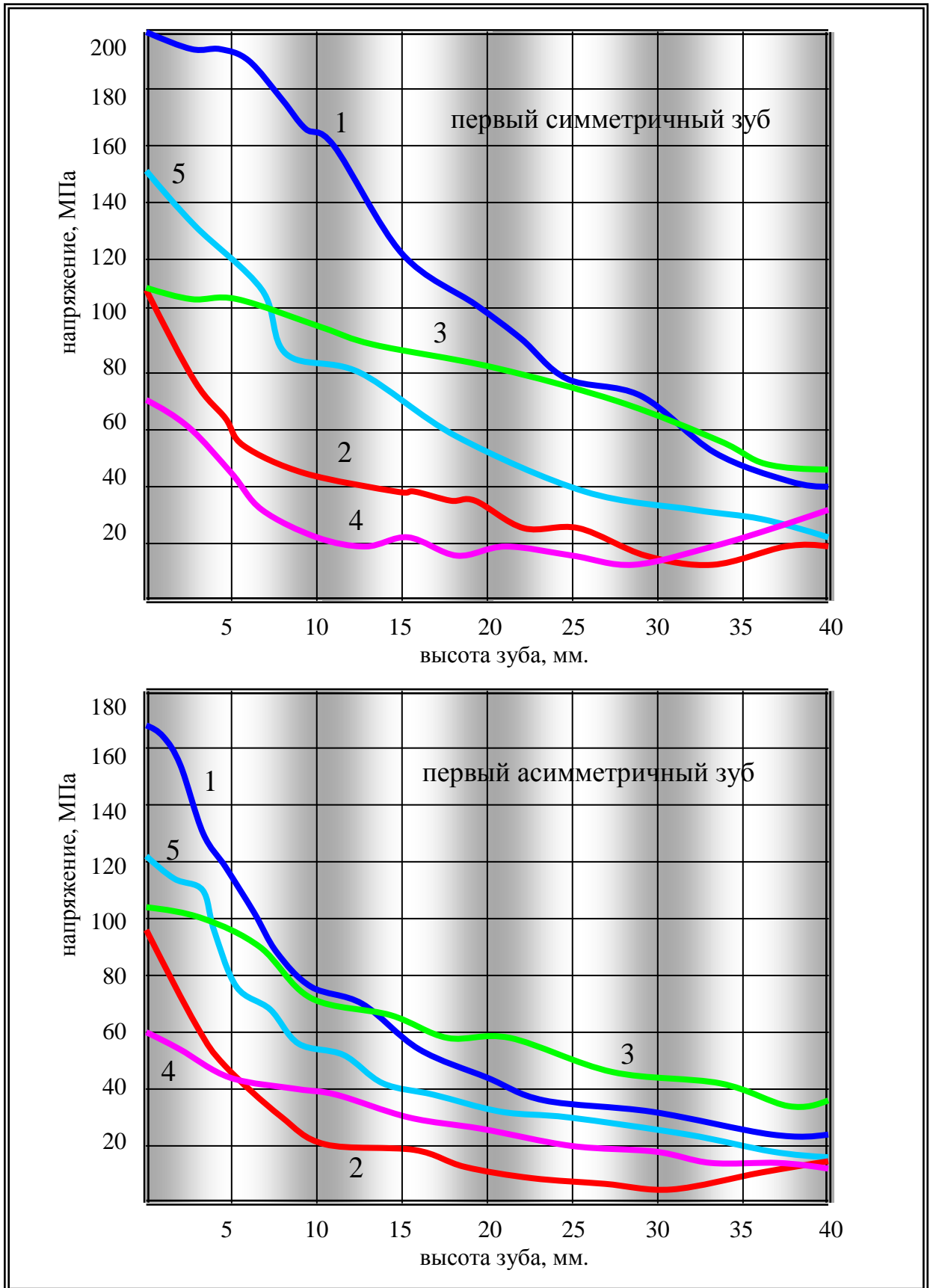


Рисунок 4.22 - Зависимости распределения напряжений по высоте зуба

1 - грань набегающая; 2 - грань сбегающая; 3 - армированная область со стороны грани набегающей; 4 - армированная область со стороны грани сбегающей; 5 - зона центральная

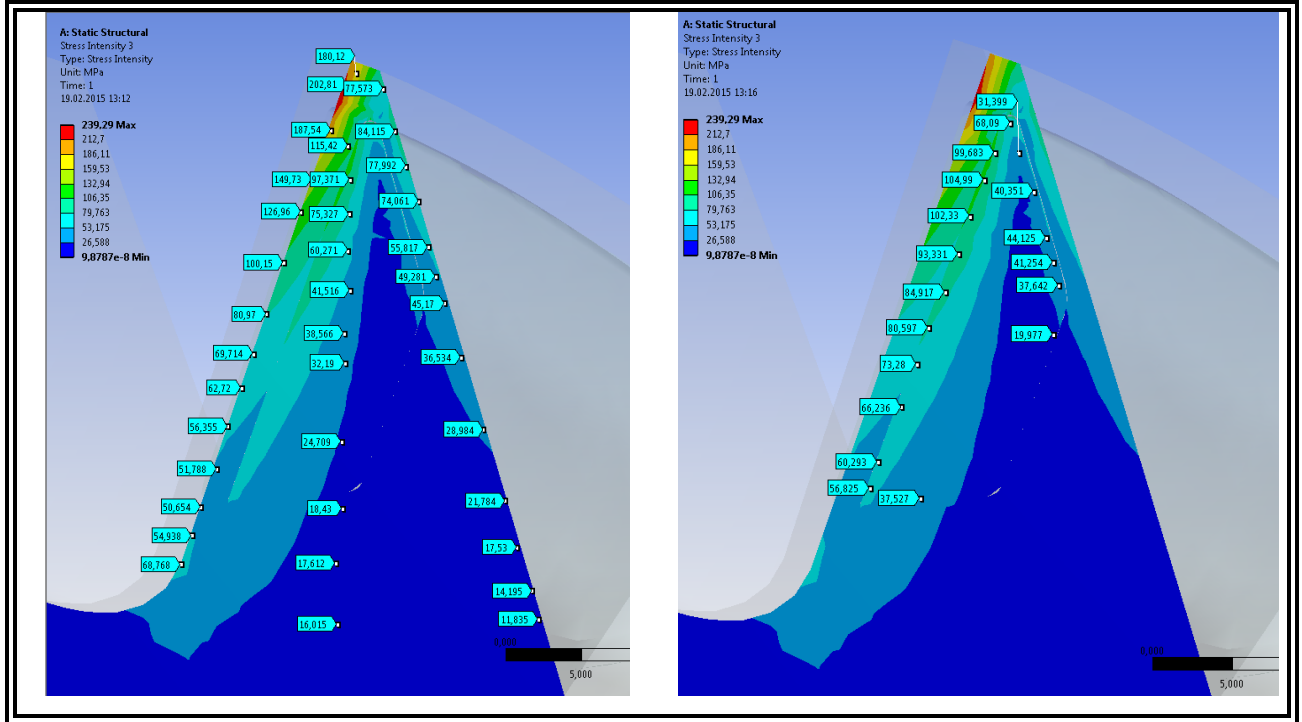


Рисунок 4.23 - Распределение напряжений по высоте второго симметричного зуба  
 1 - по средней части и граням; 2 - по периметру армированной зоны

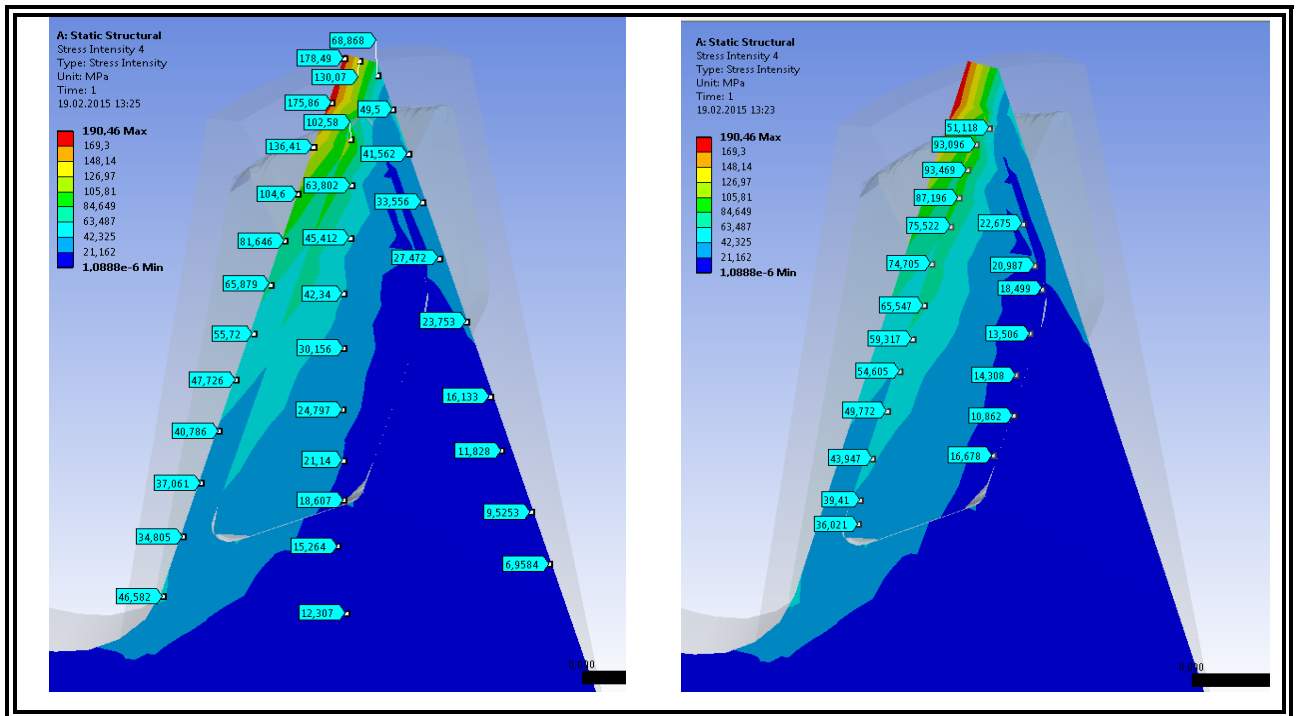


Рисунок 4.24 - Распределение напряжений по высоте второго асимметричного зуба  
 1 - по средней части и граням; 2 - по периметру армированной зоны

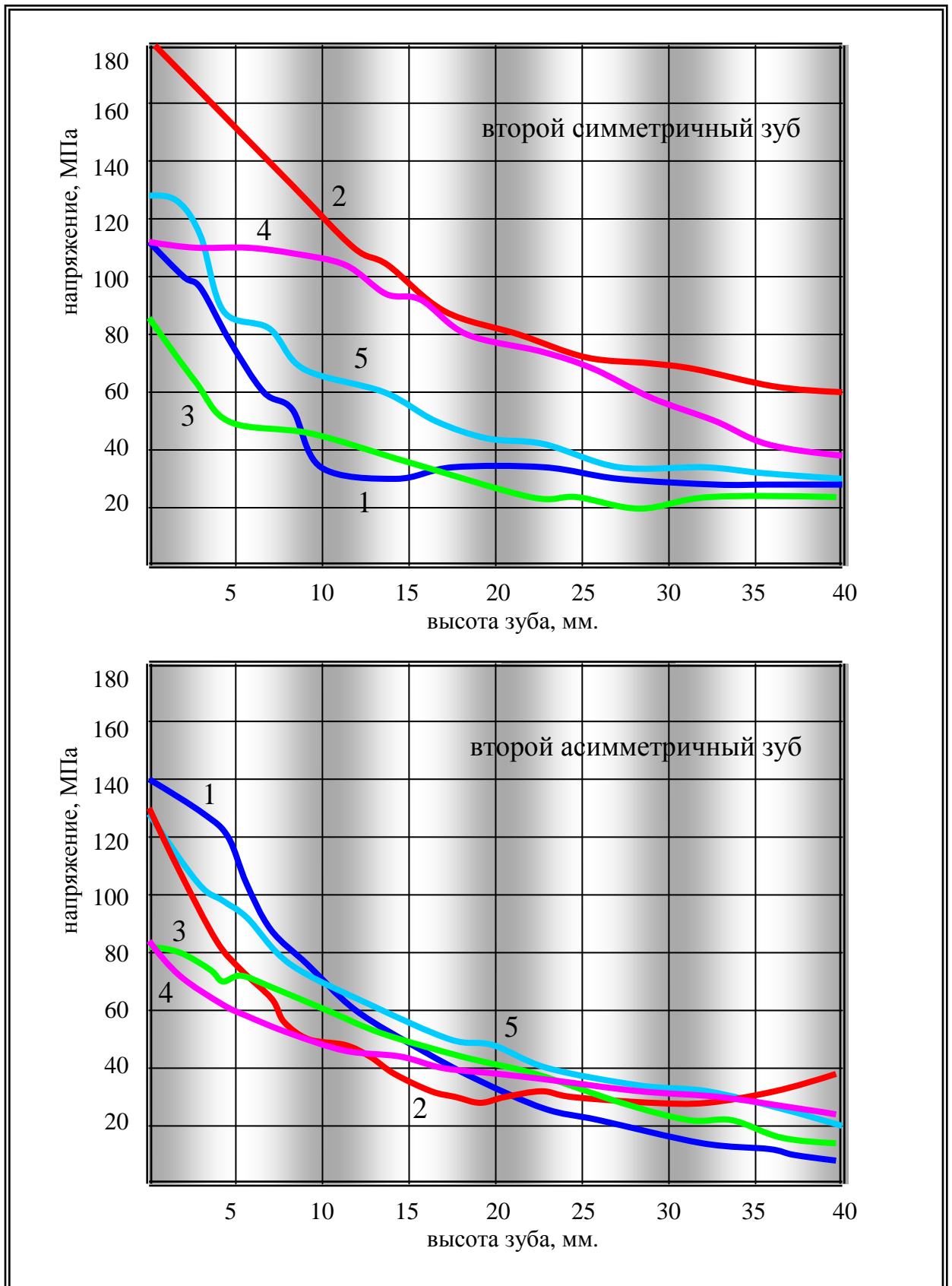


Рисунок 4.25 - Зависимости распределения напряжений по высоте зуба

1 - грань набегающая; 2 - грань сбегающая; 3 - армированная область со стороны грани набегающей; 4 - армированная область со стороны грани сбегающей; 5 - зона центральная

#### 4.6 Математическое моделирование процесса центробежного объемного армирования асимметричного косозубого вооружения шарошечного бурового инструмента

Как отмечалось ранее перспективным способом изготовления КЗВ и ПЗВ ШБИ является процесс ЦОА. Суть его сводится к тому, что происходит совмещение центробежного литья с одновременным армированием по объему зубчатого вооружения частицами твердосплавного компонента. При вращении литейной формы в нее одновременно осуществляются, заливка расплавленной стали и подача армирующего компонента в виде частиц различного размера и формы. Вследствие существенной разности, между плотностями расплавленной стали и твердого сплава, под воздействием центробежных сил  $F_C^1, F_C^2, F_C^3$ , зерна армирующего компонента двигаются от центра к периферийной зоне литейной формы и армируют по объему рабочие части зубчатого вооружения шарошек (рисунок 4.26).

На сегодняшний день наибольшее распространение получили две главные схемы процесса изготовления ЦОАЗВ ШБИ:

- свободная;
- с центральным вплавляемым стаканом [17].

Для изготовления одиночных венцов и шарошек небольших размеров с зубчатым вооружением обычно используется свободная схема заливки. В свою очередь, в процессе изготовления одиночных венцов, имеющих значительную ширину зубьев и шарошек, идущих на оснащения ШБИ большого диаметра, как правило, применяется схема, предусматривающая одновременное впавление центрального стального ковального стакана. Это объясняется тем, что в процессе центробежного литья шлаки и различные включения неминуемо концентрируются в области отливки, наиболее приближенной к ее оси вращения, что существенно снижает физико-механические характеристики металла в этой зоне. Но именно здесь впоследствии формируются внешние беговые дорожки подшипника опорного узла ШБИ. Во время заливки (рисунок 1.13.1) расплавленная сталь и твердосплавные частицы армирующего компонента, через кольцевой зазор между центральным кованным стаканом и литейной формой попадают внутрь и заполняют ее объем.

К основным технологическим параметрам, определяющим качество ЦОАЗВ, можно отнести [170, 175]:

- частота вращения литейной формы;
- температура заливаемой стали;
- температура нагрева литейной формы;
- количество и качественные характеристики армирующего компонента.

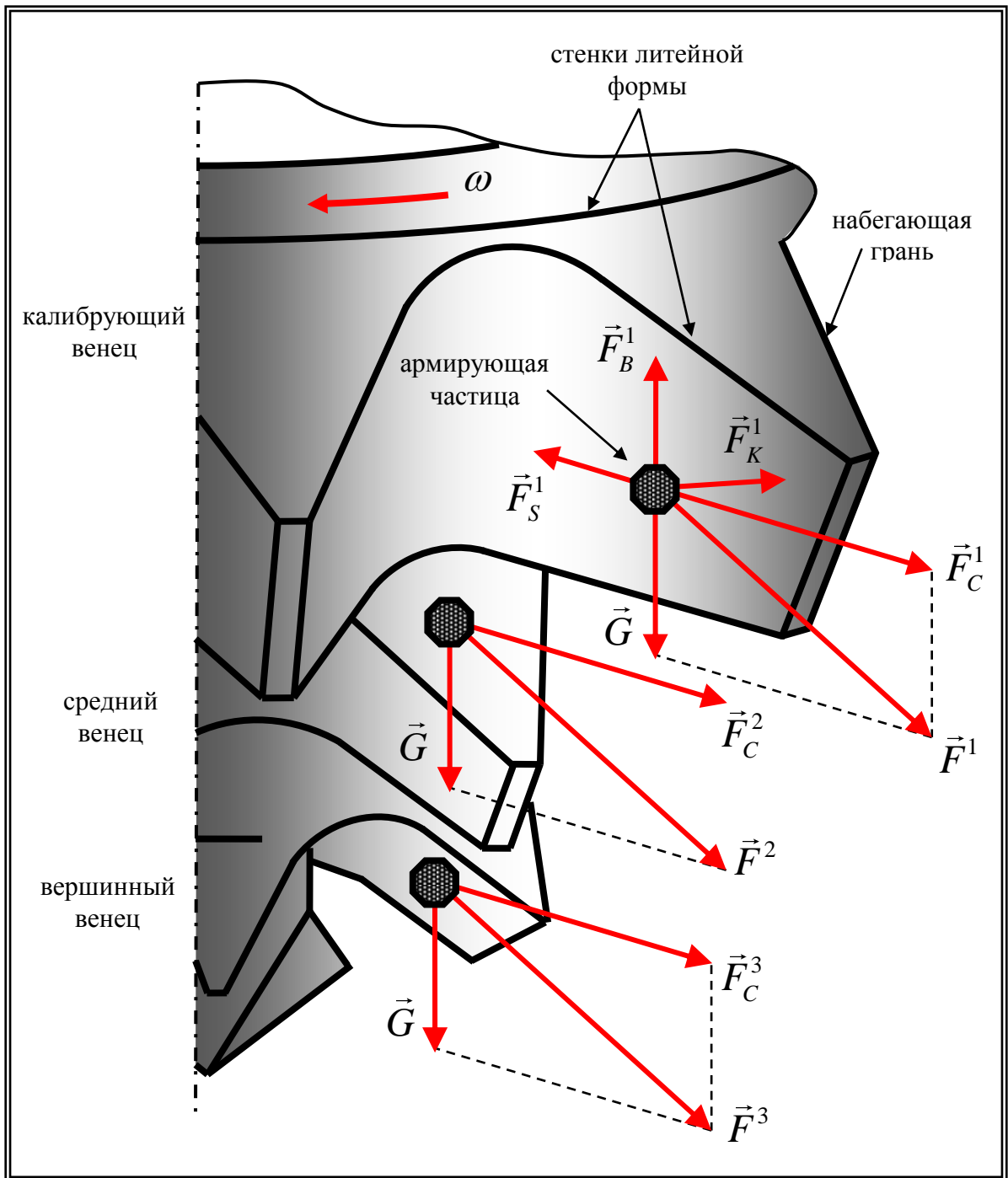


Рисунок 4.26 - Принципиальная схема процесса многоярусного центробежного объемного армирования

Вышеперечисленные параметры технологического процесса зависят не только от конструктивных особенностей зубчатого вооружения ШБИ, но и от схемы процесса ЦОА.

Частота вращения литейной формы оказывает существенное влияние на геометрию зоны армирования, ее положение относительно основных рабочих граней зубчатого вооружения ШБИ, концентрацию армирующего твердосплавного компонента и в значительной степени определяет время контакта армирующих частиц с расплавленной сталью.

Предварительное нагревание литейной формы и ее температура в основном определяют термический цикл процесса ЦОА. Он характеризуется степенью растворения зерен твердого сплава в жидком металле, а также влиянием на расположение армированной зоны по отношению к основным рабочим граням зубчатого вооружения ШБИ.

Наиболее постоянным параметром процесса ЦОА является температура расплавленного металла, однако тоже требует соблюдения точного оптимального значения для каждой конкретной марки стали.

Качество и количество армирующего твердосплавного компонента также оказывает определенное влияние на геометрию зоны армирования, ее положение относительно основных рабочих граней зубчатого вооружения ШБИ, а также концентрацию армирующего твердосплавного компонента, что в значительной степени определяет физико-механические характеристики ЦОА-КМ.

Таким образом, при установке оптимального термического цикла процесса ЦОА остальные технологические показатели можно легко регулировать за счет изменения частоты вращения литейной формы, варьируя ее значением в зависимости от схемы центробежного объемного армирования шарошек и их габаритных размеров [170].

Важным требованием, предъявляемым при изготовлении ЦОАЗВ, является обеспечение гарантированного и равномерного распределения частиц армирующего твердосплавного компонента с заданной его концентрацией по ширине зубьев ЦОАЗВ всех без исключения венцов вооружения ШБИ.

Для этого нужно определить технологические и конструктивные параметры ЦОА, которые бы дали возможность управлять этим процессом, для того чтобы получать требуемую геометрию зоны армирования внутри зубьев вооружения ШБИ.

Таким параметром является сама геометрия зубчатого вооружения. Чтобы определить влияние геометрических параметров зубчатого вооружения и режимов ЦОА на форму и расположение зоны армирования в рабочей части зубчатого вооружения, нужно определить силы и степень их влияния на зерно твердого сплава в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Для начала определим силы, действующие на зерно твердого сплава в горизонтальной плоскости (рисунок 4.27):

$F_C$  – центробежная сила, определяется как:

$$F_C = m\omega^2 r; \quad (4.25)$$

$F_K$  – сила Кориолиса, рассчитывается по следующей формуле:

$$F_K = 2m\omega v \sin \gamma; \quad (4.26)$$

$F_S$  – сила гидравлического сопротивления, равна.

$$F_S = \frac{1}{2} \left( \frac{kT}{D} + 6\pi R_3 \eta \right) v, \quad (4.27)$$

где

$m$  – масса частицы армирующего компонента, кг;

$\omega$  – скорость вращения литейной формы,  $c^{-1}$ ;

$r$  – расстояние от частицы до оси вращения, м;

$T$  – температура абсолютная,  $^{\circ}C$ ;

$k$  – const Больцмана;

$D$  – коэффициент диффузии,  $m^2/c$ ;

$R_3$  – радиус частицы армирующего компонента, м;

$\eta$  – коэффициент, характеризующий динамическую вязкость, Па·с;

$v$  – скорость относительного перемещения расплавленной стали, м/с;

$\gamma$  – угол между направлением движения и касательной к траектории движения, град.

Установим прямоугольную координатную систему, центр которой совпадает с осью вращения литейной формы, и при этом жестко связанную с ней. В этом случае система дифференциальных уравнений относительного движения твердосплавной частицы в расплавленной стали, запишется как [93]

$$\begin{cases} X'' = -ax' + \omega^2 x + 2\omega y' \\ Y'' = -ay' + \omega^2 y + 2\omega x' \end{cases}, \quad (4.28)$$

где

$$a = \frac{1}{2m} \left( \frac{kT}{D} + 6\pi R_3 \eta \right). \quad (4.29)$$

Выразим  $Y'$  через  $X$  из уравнения (4.28)

$$Y' = \frac{1}{2\omega} (X'' + aX - \omega^2 X). \quad (4.30)$$

продифференцировав уравнение (4.28), получим:

$$Y''' = -aY'' + \omega^2 Y' - 2\omega X''. \quad (4.31)$$

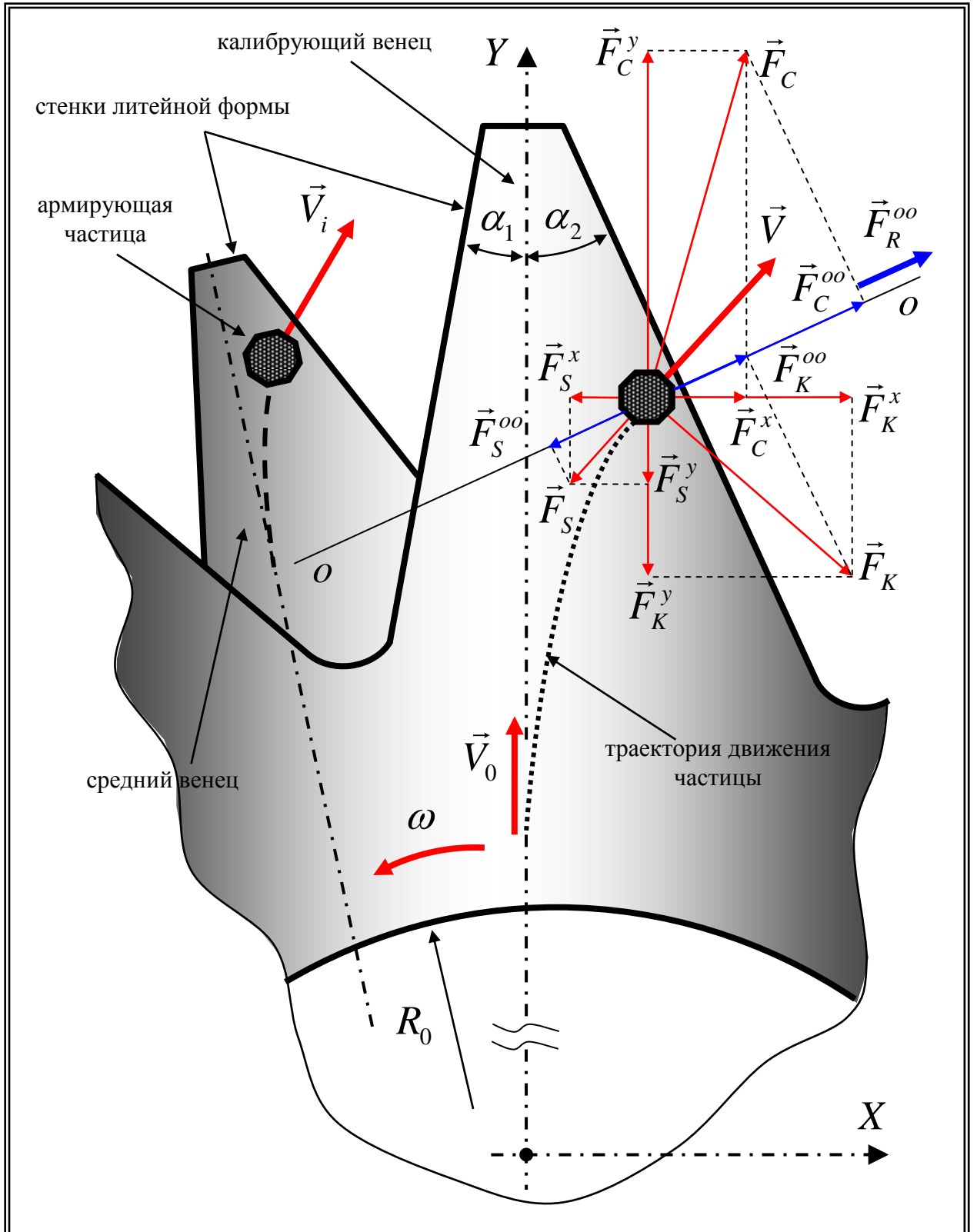


Рисунок 4.27 - Принципиальная схема сил, действующих на частицу армирующего компонента при центробежном объемном армировании вооружения в горизонтальной плоскости



Подставим уравнение (4.30) в (4.31), тогда

$$X'''' + 2aX''' + 2\omega^2 a^2 X'' - 2\omega^2 aX' + \omega^4 X = 0. \quad (4.32)$$

Далее составляем характеристическое уравнение и получаем

$$\lambda^4 + 2a\lambda^3 + 2\omega^2 a^2 \lambda^2 - 2a\omega^2 \lambda + \omega^4 = 0. \quad (4.33)$$

Разложим уравнение (4.33) на множители

$$[\lambda^2 + (a - 2i\omega)\lambda - \omega^2] * [\lambda^2 + (a + 2i\omega)\lambda - \omega^2] = 0. \quad (4.34)$$

при  $\lambda^2 + (a - 2i\omega)\lambda - \omega^2 = 0$ ;

$$\left| \begin{array}{l} \lambda_1 = \frac{-a + 2i\omega + \sqrt{(a - 2i\omega)^2 + 4\omega^2}}{2} \\ \lambda_2 = \frac{-a + 2i\omega - \sqrt{(a - 2i\omega)^2 + 4\omega^2}}{2} \end{array} \right. \quad (4.35)$$

при  $\lambda^2 + (a + 2i\omega)\lambda - \omega^2 = 0$ ;

$$\left| \begin{array}{l} \lambda_3 = \frac{-a - 2i\omega + \sqrt{(a + 2i\omega)^2 + 4\omega^2}}{2} \\ \lambda_4 = \frac{-a - 2i\omega - \sqrt{(a + 2i\omega)^2 + 4\omega^2}}{2} \end{array} \right. \quad (4.36)$$

Введем обозначения

$$U = \sqrt{\frac{a^2 + \sqrt{a^4 + 16\omega^2 a^2}}{2}}; V = \frac{2\omega a}{U}. \quad (4.37)$$

Тогда корни уравнения (4.33) запишутся следующим образом

$$\left| \begin{array}{l} \lambda_1 = \frac{U - a}{2} + i \frac{2\omega - V}{2}; \lambda_2 = \frac{-U - a}{2} + i \frac{2\omega + V}{2} \\ \lambda_3 = \frac{U - a}{2} - i \frac{2\omega - V}{2}; \lambda_4 = \frac{-U - a}{2} - i \frac{2\omega + V}{2} \end{array} \right. \quad (4.38)$$

Если обозначить

$$\alpha_1 = \frac{U - a}{2}; \alpha_2 = \frac{-U - a}{2}; \beta_1 = \frac{2\omega - V}{2}; \beta_2 = \frac{2\omega + V}{2}, \quad (4.39)$$

То решение уравнения запишется, следующим образом:

$$X = C_1 e^{\alpha_1 t} \cos \beta_1 t + C_2 e^{\alpha_1 t} \sin \beta_1 t + C_3 e^{\alpha_2 t} \cos \beta_2 t + C_4 e^{\alpha_2 t} \sin \beta_2 t. \quad (4.40)$$

Продифференцируем уравнение (4.40), тогда:

$$X' = e^{\alpha_1 t} [\cos \beta_1 t (C_1 \alpha_1 + C_2 \beta_1) + \sin \beta_1 t (C_2 \alpha_1 - C_1 \beta_1)] + e^{\alpha_2 t} [\cos \beta_2 t (C_3 \alpha_2 + C_4 \beta_2) + \sin \beta_2 t (C_4 \alpha_2 - C_3 \beta_2)]; \quad (4.41)$$

$$X'' = e^{\alpha_1 t} \left[ \cos \beta_1 t (C_1 \alpha_1^2 + 2C_2 \alpha_1 \beta_1 - C_1 \beta_1^2) + \sin \beta_1 t (C_2 \alpha_1^2 + 2C_1 \alpha_1 \beta_1 - C_2 \beta_1^2) \right] + e^{\alpha_2 t} \left[ \cos \beta_2 t (C_3 \alpha_2^2 + 2C_4 \alpha_2 \beta_2 - C_3 \beta_2^2) + \sin \beta_2 t (C_4 \alpha_2^2 - 2C_3 \alpha_2 \beta_2 - C_4 \beta_2^2) \right]. \quad (4.42)$$

Подставим уравнения (4.40), (4.41), (4.42) в уравнение (4.30), получим

$$Y' = \frac{1}{2\omega} \left[ \begin{array}{l} e^{\alpha_1 t} \left[ \cos \beta_1 t \left[ C_1 (\alpha_1^2 - \beta_1^2 + a\alpha_1 - \omega^2) + C_2 (2\alpha_1 \beta_1 + a\beta_1) \right] + \right. \\ \left. \sin \beta_1 t \left[ C_2 (\alpha_1^2 - \beta_1^2 + a\alpha_1 - \omega^2) - C_1 (2\alpha_1 \beta_1 + a\beta_1) \right] \right] + \\ + e^{\alpha_2 t} \left[ \cos \beta_2 t \left[ C_3 (\alpha_2^2 - \beta_2^2 + a\alpha_2 - \omega^2) + C_4 (2\alpha_2 \beta_2 + a\beta_2) \right] + \right. \\ \left. \sin \beta_2 t \left[ C_4 (\alpha_2^2 - \beta_2^2 + a\alpha_2 - \omega^2) - C_3 (2\alpha_2 \beta_2 + a\beta_2) \right] \right] \end{array} \right]. \quad (4.43)$$

Продифференцируем уравнение (4.43), тогда

$$Y'' = \frac{1}{2\omega} \left[ \begin{array}{l} e^{\alpha_1 t} \left[ \cos \beta_1 t (C_1 A_1 + C_2 A_2) + \sin \beta_1 t (C_1 A_2 + C_2 A_1) \right] + \\ + e^{\alpha_2 t} \left[ \cos \beta_2 t (C_3 A_3 + C_4 A_4) + \sin \beta_2 t (C_3 A_4 + C_4 A_3) \right] \end{array} \right], \quad (4.44)$$

где

$$\begin{cases} A_1 = \alpha_1^3 - \alpha_1 \beta_1^2 - 2\alpha_1 \beta_1^2 + a\alpha_1^2 - a\beta_1^2 - \omega^2 \alpha_1 \\ A_2 = 2\alpha_1^2 \beta_1 + \alpha_1^2 \beta_1 - \beta_1^3 + 2a\alpha_1 \beta_1 - \omega^2 \beta_1 \\ A_3 = \alpha_2^3 - \alpha_2 \beta_2^2 - 2\alpha_2 \beta_2^2 + a\alpha_2^2 - a\beta_2^2 - \omega^2 \alpha_2 \\ A_4 = 2\alpha_2^2 \beta_2 + \alpha_2^2 \beta_2 - \beta_2^3 + 2a\alpha_2 \beta_2 - \omega^2 \beta_2 \end{cases}; \quad (4.45)$$

из уравнения (4.26) выразим координату  $Y$  на основе выражений (4.41), (4.43), (4.44):

$$Y = \frac{1}{2\omega^3} \left[ \begin{array}{l} e^{\alpha_1 t} \left[ \cos \beta_1 t (C_1 A_1 + C_2 A_2) + \sin \beta_1 t (C_1 A_2 + C_2 A_1) \right] + \\ + e^{\alpha_2 t} \left[ \cos \beta_2 t (C_3 A_3 + C_4 A_4) + \sin \beta_2 t (C_3 A_4 + C_4 A_3) \right] \end{array} \right] + \frac{1}{2\omega^3} \left[ \begin{array}{l} e^{\alpha_1 t} \left[ \cos \beta_1 t (C_1 B_1 + C_2 B_2) + \sin \beta_1 t (C_2 B_1 - C_1 B_2) \right] + \\ + e^{\alpha_2 t} \left[ \cos \beta_2 t (C_3 B_3 + C_4 B_4) + \sin \beta_2 t (C_4 B_3 - C_3 B_4) \right] \end{array} \right] + \frac{2}{\omega} \left[ \begin{array}{l} e^{\alpha_1 t} \left[ \cos \beta_1 t (C_1 \alpha_1 + C_2 \beta_2) + \sin \beta_1 t (C_2 \alpha_1 - C_1 \beta_2) \right] + \\ + e^{\alpha_2 t} \left[ \cos \beta_2 t (C_3 \alpha_2 + C_4 \beta_2) + \sin \beta_2 t (C_4 \alpha_2 - C_3 \beta_2) \right] \end{array} \right], \quad (4.46)$$

где

$$\begin{cases} B_1 = \alpha_1^2 - \beta_1^2 + a\alpha_1 - \omega^2 \\ B_2 = 2\alpha_1 \beta_1 + a\beta_1 \\ B_3 = \alpha_2^2 - \beta_2^2 + a\alpha_2 - \omega^2 \\ B_4 = 2\alpha_2 \beta_2 + a\beta_2 \end{cases}. \quad (4.47)$$

Чтобы определить постоянные  $C_1, C_2, C_3, C_4$  зададим начальные условия, равные

$$X(0) = 0; X'(0) = 0; Y(0) = R_0; Y'(0) = v_0. \quad (4.48)$$

Решая систему этих уравнений, получаем

$$\begin{cases}
C_1 = -C_3 \\
C_2 = \frac{C_3(\alpha_1 - \alpha_2) - C_4\beta_2}{\beta_1} \\
C_3 = \frac{\frac{2\omega v_0(J_2 - J_4)}{2\alpha_1\beta_1 + a\beta_1 + 2\alpha_2 + a} + 2\omega^3 R_0}{\frac{\alpha_1^2 - 2\alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2 - \beta_2^2 + \beta_1^2}{2\alpha_1\beta_1 + a\beta_1 + 2\alpha_2 + a}(J_2 - J_4) + \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\beta_1}\right)J_2 - J_1 + J_3}, \\
C_4 = \frac{2\omega v_0\beta_1 - C_3(\alpha_1^2\beta_1 - 2\alpha_1\alpha_2\beta_1 + \alpha_2^2\beta_1 - \beta_1\beta_2^2 + \beta_1^3)}{2\alpha_1\beta_1\beta_2 + a\beta_1\beta_2 + 2\alpha_2\beta_2 + a\beta_2}
\end{cases}, \quad (4.49)$$

где

$$\begin{cases}
J_1 = \alpha_1^3 - 3\alpha_1\beta_1^2 + 2a\alpha_1^2 - 2a\beta_1^2 + a^2\alpha_1 - a\omega^2 + 3\omega^2\alpha_1 \\
J_2 = 3\alpha_1^2\beta_1 - \beta_1^3 + 4a\alpha_1\beta_1 + a^2\beta_1 + 3\omega^2\beta_1 \\
J_3 = \alpha_2^3 - 3\alpha_2\beta_2^2 + 2a\alpha_2^2 - 2a\beta_2^2 + a^2\alpha_2 - a\omega^2 + 3\omega^2\alpha_2 \\
J_4 = 3\alpha_2^2\beta_2 - \beta_2^3 + 4a\alpha_2\beta_2 + a^2\beta_2 + 3\omega^2\beta_2
\end{cases}. \quad (4.50)$$

Чтобы определить величину результирующей силы  $F_R^{oo}$ , действие которой направлено перпендикулярно поверхности литейной формы (рисунок 4.28), необходимо спроецировать составляющие сил, действующих на частицу армирующего компонента, на линию «о-о».

В этом случае

$$F_R^{oo} = F_C^{oo} + F_K^{oo} - F_S^{oo}; \quad (4.51)$$

$$F_R^{oo} = m\omega^2(Y \sin \alpha_2 + X \cos \alpha_2) + m\omega(X' \cos \alpha_2 - Y' \sin \alpha_2) - a(X' \cos \alpha_2 + Y' \sin \alpha_2), \quad (4.52)$$

где

$\alpha_2$  - угол асимметрии по горизонтали зубьев ШБИ, град.

Изучим некоторые аспекты поведения зерен армирующего твердосплавного компонента в зависимости от геометрических параметров зубчатого вооружения и скорости вращения литейной формы в вертикальной системе координат.

Из схемы, показанной на (рисунок 4.28) видно, что на зерно твердого сплава в процессе ЦОА, в вертикальной системе координат фактически воздействует лишь одна сила тяжести  $G$ . Это и объясняет тот факт, что в общеизвестных условиях осуществления процесса ЦОА частицы армирующего компонента преимущественно концентрируются в нижней части зубьев вооружения. В свою очередь, это приводит к значительной неравномерности распределения армирующего твердосплавного компонента по всей ширине зубьев вооружения ШБИ. Практика применения ЦОА свидетельствует о том, что за счет увеличения скорости вращения литейной формы можно добиться относительной равномерности распределения частиц армирующего твердосплавного компонента по всей ширине зубьев вооружения шарошек [109].

Однако это влечет за собой существенное увеличение концентрации частиц твердого сплава в армированной зоне и снижение стойкости ЦОАЗВ к восприятию знакопеременных динамических нагрузок, что существенно снижает ресурс работы ШБИ.

При центробежном объемном армировании КЗВ, которое характеризуется наличием определенного угла наклона основных рабочих граней зубьев по отношению к образующей шарошки, создаются условия, способствующие движению зерен твердого сплава вверх, при этом без необходимости увеличения скорости вращения литейной формы.

Если высказать предположение, что в системе координат  $Z_1 - X$  частица армирующего компонента, попавшая на наклонную стенку керамической формы, будет находиться в равновесии, то тогда силы, действующие на нее по осям  $X$  и  $Z_1$ , будут уравновешены (рисунок 4.28).

В связи с этим при осуществлении ЦОА КЗВ ШБИ нужно при постоянной скорости вращения литейной формы найти способ, позволяющий гарантированно перемещать зерна твердого сплава вверх. С этой целью спроецируем векторы всех сил, действующих на зерно твердого сплава в вертикальной плоскости на ось « $b - b$ » (рисунок 4.28):

$$G \sin \beta + F_s = F_R^{oo} \cos \beta, \quad (4.53)$$

где

$F_R^{oo}$  – результирующая сила, действующая на частицу армирующего компонента в направлении перпендикулярном к стенке литейной формы в горизонтальной плоскости;

$G$  – сила тяжести, воздействующая на частицу армирующего компонента;

$\beta$  – угол наклона основных рабочих граней зубьев вооружения по отношению к образующей, шарошки, град.

Таким образом, единственным возможным способом, позволяющим гарантированно перемещать зерна твердого сплава вверх, является существующая возможность использовать действующую в горизонтальной плоскости результирующую силу  $F_R^{oo}$  (рисунок 4.27). Эту задачу можно успешно решить определенными конструктивными решениями. При осуществлении наклона зубьев вооружения ШБИ по отношению к горизонтали в направлении действующей результирующей силы  $F_R^{oo}$ , а также при выполнении неравенства [109]:

$$G \sin \beta < F_R^{oo} \cos \beta; \quad (4.54)$$

$$\frac{4}{3} \pi R^3 g (\rho_3 - \rho) \operatorname{tg} \beta < m \omega^2 (Y \sin \alpha_2 + X \cos \alpha_2) + m \omega (X' \cos \alpha_2 - Y' \sin \alpha_2) - a (X' \cos \alpha_2 + Y' \sin \alpha_2). \quad (4.55)$$

гарантированно создаются условия, обеспечивающие движение зерен твердого сплава вверх.

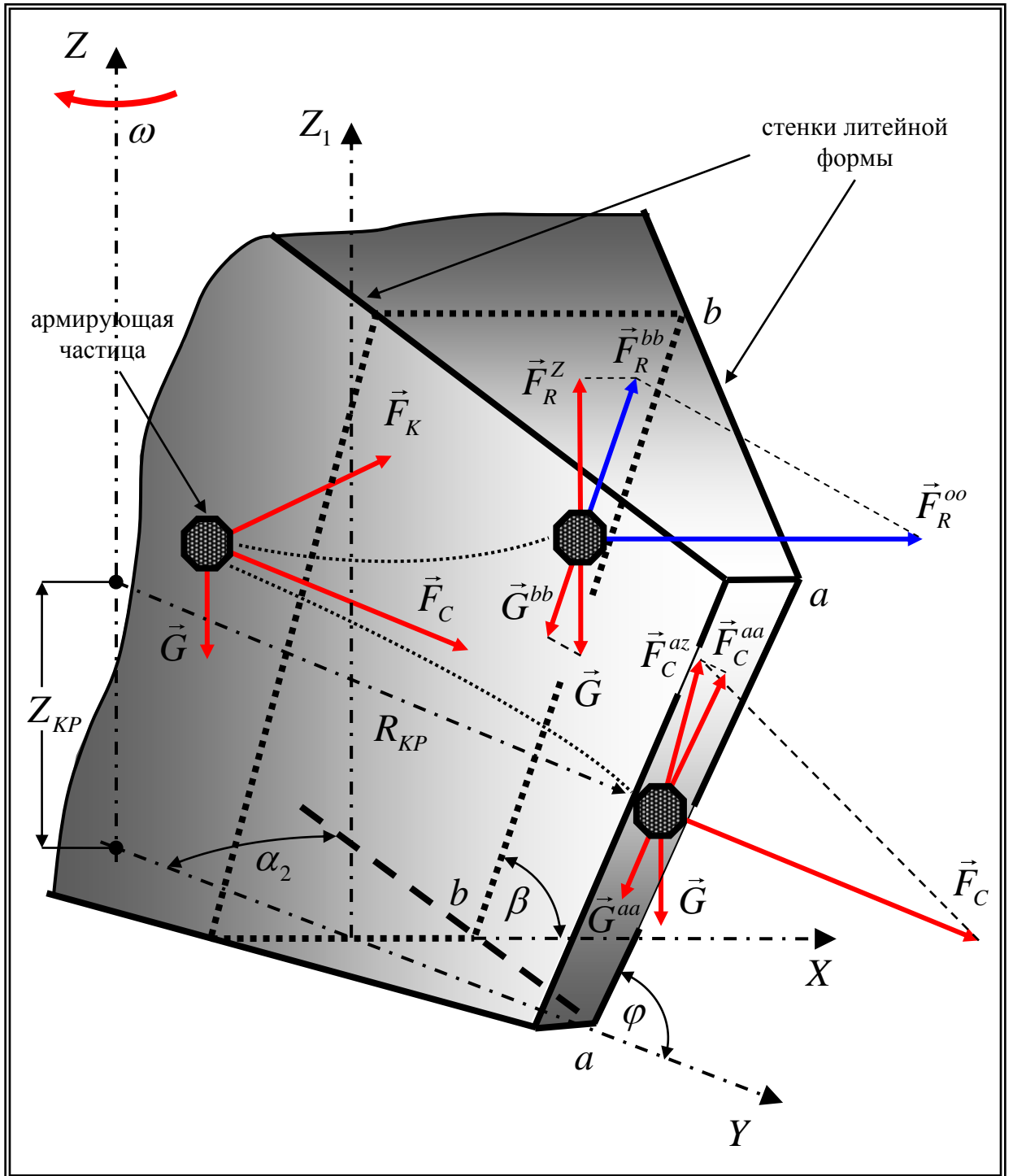


Рисунок 4.28 - Схема сил, действующих на частицу армирующего компонента при ЦОА КЗВ в вертикальной плоскости

В то же время при

$$\frac{4}{3}\pi R^3 g (\rho_3 - \rho) \operatorname{tg} \beta > m\omega^2 (Y \sin \alpha_2 + X \cos \alpha_2) + m\omega (X' \cos \alpha_2 - Y' \sin \alpha_2) - a (X' \cos \alpha_2 + Y' \sin \alpha_2). \quad (4.56)$$

гарантированно создаются условия обеспечивающие движение зерен твердого сплава вниз.

Силу гидравлического сопротивления  $F_S$ , действующую на частицу твердого сплава при ее движении в расплавленной стали, можно не учитывать, в связи с тем, что она уже использовалась при определении величины результирующей силы  $F_R^{oo}$ .

В таком случае угол наклона (косозубость) зубьев вооружения в горизонтальной плоскости, обеспечивающий состояние равновесия частиц армирующего твердосплавного компонента в вертикальной системе координат в процессе ЦОА, будет определяться согласно следующему выражению:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{m\omega^2 (Y \sin \alpha_2 + X \cos \alpha_2) + m\omega (X' \cos \alpha_2 - Y' \sin \alpha_2) - a (X' \cos \alpha_2 + Y' \sin \alpha_2)}{\frac{4}{3}\pi R^3 g (\rho_3 - \rho)}. \quad (4.57)$$

Соответственно, в случае угла наклона  $\beta$  зубьев вооружения в горизонтальной плоскости меньше этого расчетного значения, гарантированно создаются условия, обеспечивающие движение частиц армирующего твердосплавного компонента вверх. То есть каждое значение скорости литейной формы  $\omega$  имеет свой критический угол  $\beta_{KP}$ . Если угол наклона зуба вооружения  $\beta > \beta_{KP}$ , частицы армирующего твердосплавного компонента, попадая на стенку литейной формы, осуществляют движение вверх, а при  $\beta < \beta_{KP}$  частицы армирующего твердосплавного компонента перемещаются в нижнюю область армируемого объема.

Таким образом, при увеличении скорости вращения литейной формы и уменьшении угла косозубости  $\beta$ , а также одновременном увеличении угла  $\alpha_2$  направление движения частиц армирующего твердосплавного компонента меняется от опускания вниз к продвижению вверх.

Далее исследуем случай, когда частица армирующего твердосплавного компонента достигла конусообразного края литейной формы, формирующей поверхности площадок притуплений изготавливаемого зубчатого вооружения. В связи с этим необходимо ввести еще одну систему координат  $Z - Y$ .

Если высказать предположение, что в системе координат  $Z - Y$  частица армирующего компонента, попавшая на наклонную стенку керамической формы, будет находиться в равновесии, то тогда силы, действующие на нее по осям  $Z$  и  $Y$ , будут уравновешены (рисунок 4.28).

В связи с этим при осуществлении ЦОА КЗВ ШБИ нужно при постоянной скорости вращения литейной формы найти способ, позволяющий гарантированно перемещать зерна твердого сплава

ва вверх. С этой целью спроецируем векторы всех сил, действующих на зерно твердого сплава на ось « $a-a$ » (рисунок 4.28), тогда

$$G^{aa} = F_C^{aa}; \quad (4.58)$$

$$G \sin \varphi = F_C \cos \varphi \cos \beta; \quad (4.59)$$

$$\cos \beta = \frac{G \operatorname{tg} \varphi}{F_C}, \quad (4.60)$$

где

$\varphi$  – угол наклона образующей основного конуса шарошки по отношению к горизонтали, град.

с учетом того, что

$$F_C = \frac{4}{3} \pi R^3 (\rho_3 - \rho) \omega^2 r; \quad (4.61)$$

$$G = \frac{4}{3} \pi R^3 (\rho_3 - \rho) g. \quad (4.62)$$

Получаем

$$\omega^2 r = \frac{g \operatorname{tg} \varphi}{\cos \beta}. \quad (4.63)$$

Если  $\omega^2 r > \frac{g \operatorname{tg} \varphi}{\cos \beta}$ , частица армирующего твердосплавного компонента по отношению к

оси  $Z$  перемещается вверх, а в случае, когда  $\omega^2 r < \frac{g \operatorname{tg} \varphi}{\cos \beta}$ , движется вниз.

То есть каждое значение скорости литейной формы  $\omega$  имеет свое критическое значение силы  $R_{KP}$ . Если частицы армирующего твердосплавного компонента находятся в объеме, расположенном выше определенной координаты  $Z_{KP} = r \operatorname{tg} \varphi$ , то, попадая на стенку литейной формы, осуществляют движение вверх, а при  $Z_{KP} < R_{KP} \operatorname{tg} \varphi$  частицы армирующего твердосплавного компонента перемещаются в нижнюю область армируемого объема. В случае равномерного распределения частиц армирующего твердосплавного компонента в потоке расплавленной стали от значения  $Z_{KP}$  во многом зависит, будет ли двигаться основная масса армирующего материала в верхнюю или нижнюю часть (по ширине) зубчатого вооружении шарошки.

Таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение частиц твердого сплава по высоте и ширине зубчатого вооружения ШБИ, изначально необходимо определить скорость вращения литейной формы как одного из основных факторов технологического процесса ЦОА, обеспечивающего передвижение частиц армирующего твердосплавного компонента в область армирования. Затем на основании приведенного ранее теоретического исследования можно ус-

тановить допускаемый диапазон изменения углов наклона  $\beta$  и асимметрии  $\alpha_2$  косозубого вооружения с учетом ранее вычисленной скорости вращения.

Для определения правильности результатов теоретического исследования, посредством экспериментального определения взаимного влияния следующих характеристик: частоты вращения литейной формы, угла косозубости зубьев по отношению к горизонтали  $\beta$  и угла асимметрии  $\alpha_2$  зубчатого вооружения шарошек в процессе ЦОА на геометрическую форму зоны армирования, был проведен целый ряд лабораторных исследований.

По технологии ЦОА была изготовлена партия опытных образцов зубчатого вооружения, главной особенностью которой являлось различное расположение рабочих головок зубьев по отношению к горизонтали, то есть с разными значениями углов наклона основных рабочих граней зубьев к горизонтали, а также с разной асимметрией их рабочих головок. При этом изменение угла наклона  $\beta$  осуществлялось в диапазоне  $45^\circ - 85^\circ$  и шагом в  $5^\circ$ . Изменение угла асимметрии зубьев  $\alpha_2$  осуществлялось в диапазоне  $25^\circ - 45^\circ$  и аналогичным шагом в  $5^\circ$ .

При изготовлении опытных образцов зубьев вооружения варьировалась и скорость вращения литейной формы:  $50-90 \text{ с}^{-1}$ , с шагом  $5 \text{ с}^{-1}$ . Данный диапазон скоростей вращения обусловлен тем, что именно в этом интервале обеспечивается требуемая концентрация  $35 \div 55\%$  зерен твердого сплава в армированной зоне. В результате при каждой фиксации скорости вращения литейной формы изготавливались образцы вооружения с разными углами наклона зубьев и асимметрией их рабочих головок.

По завершении изготовления каждый зубчатый элемент подвергался операции по определению геометрической формы и размеров зоны армирования.

За требуемо-допустимую форму распределения частиц армирующего твердосплавного компонента по ширине зубчатого вооружения была установлена геометрия армированной зоны со следующим соотношением верхней  $h_1$  и нижней  $h_2$  частей (рисунок 4.29):

$$h_1 = (0,5 \div 0,6) H ; \quad (4.64)$$

$$h_2 = h_1 + \left[ L + h_1 (tg \alpha_1 + tg \alpha_2) \right] \left[ 1 + \frac{\sin \alpha_2 \sin \psi}{\cos(\psi + \alpha_2)} \right] tg \psi , \quad (4.65)$$

где

$L_i$  - большая сторона площадки притупления зуба, мм;

$\alpha_1$  - угол, образованный между верхним торцом зуба и перпендикуляром к его площадке притупления, град;



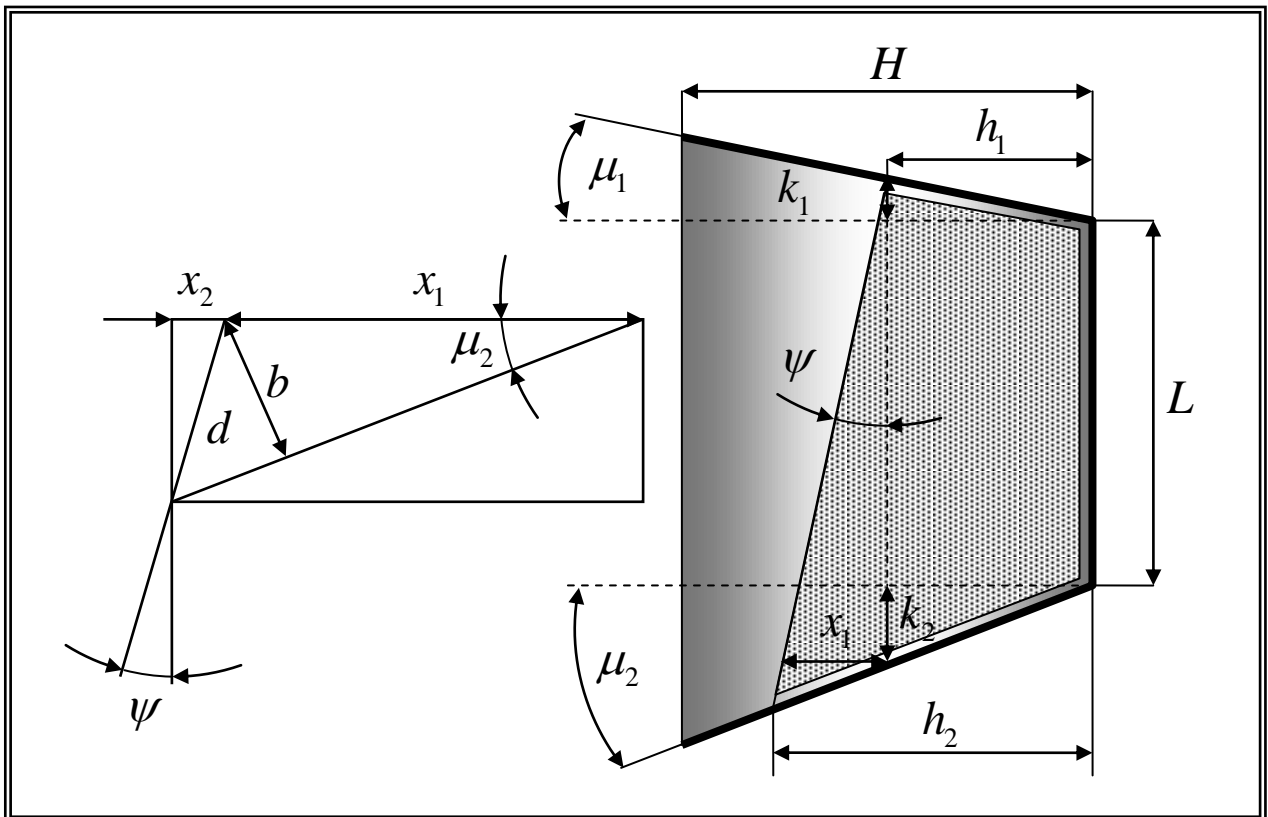
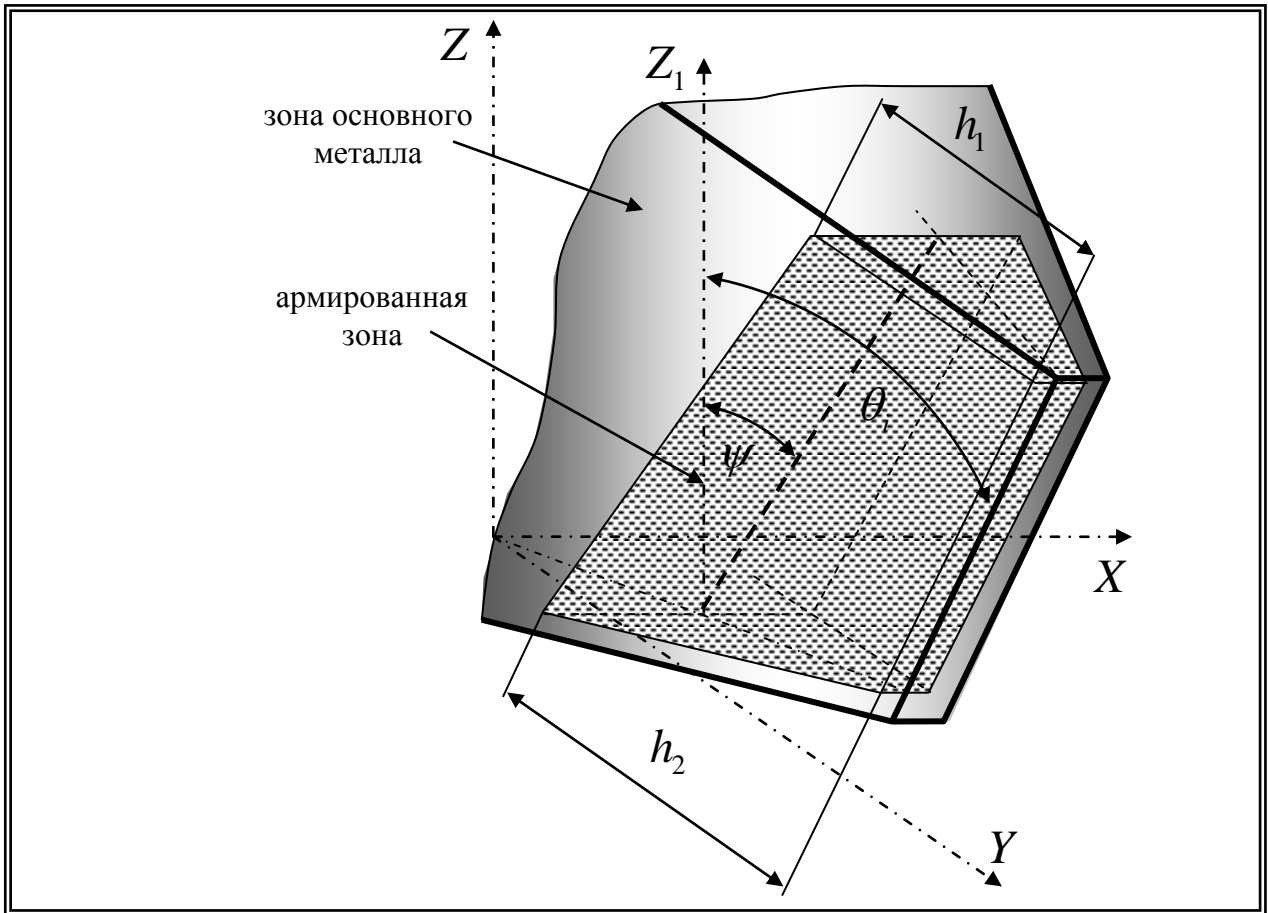


Рисунок 4.29 - Допустимая форма расположения зерен твердого сплава по ширине зубьев центробежно-объемно-армированного вооружения

$\psi$  - среднее значение угла наклона задней поверхности зоны армирования к площадке притупления зуба, град.;

$\alpha_2$  - угол, образованный, между нижним торцом зуба и перпендикуляром к его площадке притупления, град.;

$H_i$  - вылет зуба вооружения ШБИ, мм.

При этом величина усредненного угла наклона задней поверхности зоны армирования  $\psi$ , может отличаться от величины угла конусности конкретного венца шарошки  $\theta_i$  в пределах  $5^0$ - $25^0$ .

$$k_1 = h_1 \operatorname{tg} \mu_1; \quad (4.66)$$

$$k_2 = h_1 \operatorname{tg} \mu_2; \quad (4.67)$$

$$x_1 = (k_1 + L + k_2) \operatorname{tg} \psi = (h_1 \operatorname{tg} \mu_1 + l + h_1 \operatorname{tg} \mu_2) \operatorname{tg} \psi = [L + h_1 (\operatorname{tg} \mu_1 + \operatorname{tg} \mu_2)] \operatorname{tg} \psi; \quad (4.68)$$

$$b = x_1 \sin \mu_2; b = d \sin (90 - \psi - \mu_2) = d \cos (\psi + \mu_2); \quad (4.69)$$

$$x_1 \sin \mu_2 = d \cos (\psi + \mu_2); \quad (4.70)$$

$$d = \frac{x_1 \sin \mu_2}{\cos (\psi + \mu_2)}; \quad (4.71)$$

$$x_2 = d \sin \psi = \frac{x_1 \sin \mu_2 \sin \psi}{\cos (\psi + \mu_2)}; \quad (4.72)$$

$$x_1 + x_2 = x_1 \left( 1 + \frac{\sin \mu_2 \sin \psi}{\cos (\psi + \mu_2)} \right); \quad (4.73)$$

$$h_2 = h_1 + [L + h_1 (\operatorname{tg} \mu_1 + \operatorname{tg} \mu_2)] \left[ 1 + \frac{\sin \mu_2 \sin \psi}{\cos (\psi + \mu_2)} \right] \operatorname{tg} \psi. \quad (4.74)$$

Анализ геометрии армированной зоны опытных образцов зубчатого вооружения свидетельствует о том, что при увеличении скорости вращения литейной формы, так же, как и при уменьшении величин углов наклона боковых рабочих граней зубьев к горизонтали, гарантированно создаются условия, обеспечивающие движение частиц армирующего твердосплавного компонента вверх. В результате армирующие частицы концентрируются в верхней части зуба. Соответственно при уменьшении скорости вращения литейной формы, так же, как и при увеличении углов наклона основных боковых поверхностей зубьев к горизонтальной плоскости, гарантированно создаются условия, обеспечивающие движение частиц армирующего твердосплавного компонента вниз. В результате армирующие частицы концентрируются в нижней части зуба.

Влияние изменения углов асимметрии на геометрическую форму зоны армирования гораздо менее значительно и обладает обратной тенденцией [132].

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования, описанные выше, позволили установить взаимовлияние скорости вращения литейной формы и углов косоугольности и асимметрии зубьев вооружения ШБИ в процессе ЦОА на распределение частиц армирующего твердосплавного компонента по ширине центробежно-объемно-армированного косоугольного вооружения (рисунок 4.30).

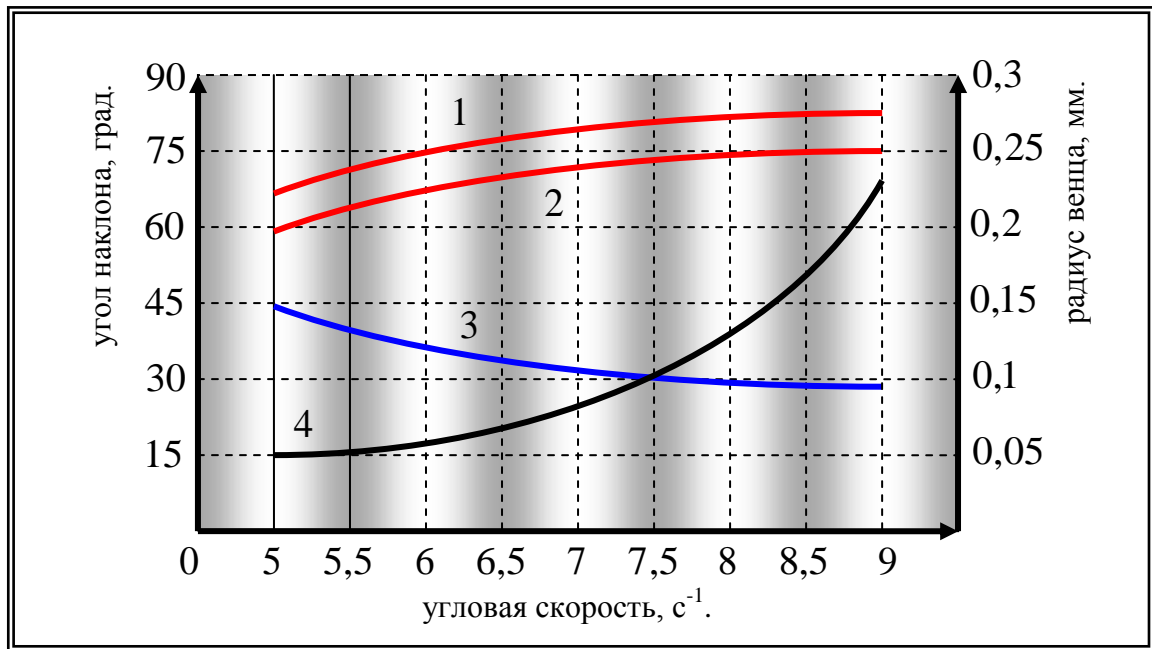


Рисунок 4.30 - Влияние скорости вращения и различных параметров геометрии вооружения на равномерность распределения частиц армирующего твердосплавного компонента по ширине зубьев вооружения

1 и 2 - от угла наклона зубьев вооружения к горизонтали  $\beta$ ; 3 - от величины асимметрии зубьев  $\alpha_2$ ; 4 - от удаленности от оси вращения центробежной машины  $r$

#### 4.7 Расчет геометрических параметров зоны армирования, обеспечивающей повышенную стойкость зубьев вооружения шарошек к ударным нагрузкам

В настоящее время разработано множество конструкций ЦОАЗВ [17, 41, 93, 170]. Однако все эти конструкции отличаются между собой либо геометрией зубчатых элементов, либо технологией их изготовления. В этой связи недостаточно изученными оставались вопросы, связанные с влиянием геометрии зоны армирования на долговечность и эффективность центробежно-объемно-армированного зубчатого вооружения.

Наиболее распространенной формой зоны армирования является форма, показанная на (рисунок 4.29). Однако данная геометрия армированной зоны не является эффективной при наличии ее у ЦОАЗВ, работающего в условиях значительного знакопеременного ударного нагружения. По причине того, что при насыщении стальной матрицы ЦОАЗВ зернами износостойкого материала происходят растворение поверхностных слоев зерен и, вследствие этого, охрупчивание рабочей части зубчатых элементов [170]. В результате этого при бурении происходят частичное скалывание и притупление рабочей части ЦОАЗВ, что приводит к уменьшению удельного контактного давления на породу и снижению эффективности работы ШБИ.

С целью устранения этого недостатка, путем повышения стойкости ЦОАЗВ к знакопеременному ударному нагружению, была разработана новая конструкция зубчатого элемента ЦОАЗВ с новой геометрией зоны армирования (рисунок 4.31). Суть новой разработки заключается в том, что износостойкий материал расположен слоем под набегающей гранью. Это позволяет повысить сопротивляемость рабочей части ЦОАЗВ к изгибающим нагрузкам посредством того, что больший объем рабочей головки зуба, выполнен из неохрупченной вторичными карбидами стали, которые образуются при частичном растворении зерен твердого сплава в процессе изготовления ЦОАЗВ [16, 170].

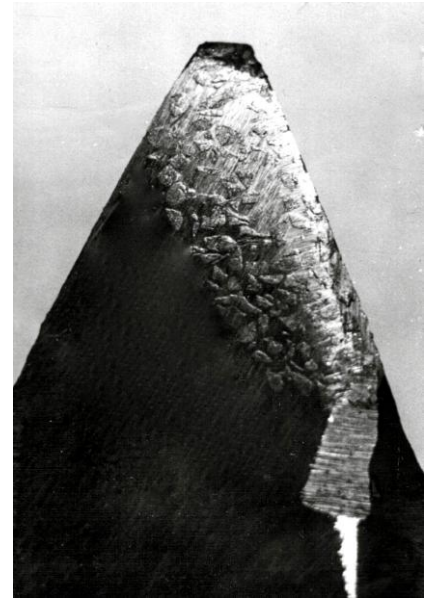


Рисунок 4.31 - Поперечный срез зуба ЦОАЗВ

Размещение износостойкого материала именно под набегающей, а не сбегающей гранью, вызвано необходимостью упрочнения именно этой поверхности зубчатого элемента, поскольку именно она является наиболее нагруженной и испытывает наибольшее воздействие породы [1, 19, 21, 46]. В то же время такое размещение износостойкого материала способствует проявлению эффекта самозатачивания рабочей части режущих элементов ЦОАЗВ при бурении. Это объясняется тем, что темп износа неупрочненной сбегающей грани будет выше, чем у набегающей.

Помимо этого, необходимо, чтобы армированная зона располагалась на некотором расстоянии от поверхности набегающей грани. Это объясняется следующими соображениями. Зерна износостойкого материала, например релита или ВК, получают дроблением исходных материалов, в процессе которого в зернах зарождаются микротрещины, в результате чего зерна, являясь хорошим износостойким материалом, в то же время являются хрупкими и не выдерживают ударные и изгибающие нагрузки [17, 40, 170]. Поэтому если верхнюю границу слоя износостойкого материала вынести на поверхность набегающей грани, то при бурении будет на-

блюждаться быстрое выкрашивание верхних зерен под воздействием знакопеременных ударных нагрузок. При этом будут обнажаться нижележащие слои зерен и работа всего износостойкого слоя будет сопровождаться постепенным его выкрашиванием.

Кроме того, защитный слой металла предохраняет зерна износостойкого материала от окисления и выкрашивания в процессе ХТО, которой впоследствии подвергается ЦОАЗВ.

Разработанная конструкция ЦОАЗВ с новой геометрией зоны армирования потребовала разработать технологический процесс ее реализации. Для этого было необходимо установить, как влияет скорость вращения литейной формы, на силы, действующие на зерно твердого сплава и расположение поверхностей литейной формы, образующих рабочую часть зубьев вооружения ШБИ в процессе ЦОА, на геометрию армированной зоны [93]. Известно, что математическое описание процесса центробежного объемного армирования сводится к описанию движения зерна армирующего компонента в жидкой стали под действием центробежных сил.

На зерно износостойкого материала (рисунок 4.26), находящегося в жидкой стали во вращающейся системе, представляющей собой в общем случае цилиндр, ось которого расположена перпендикулярно оси вращения литейной формы, действуют несколько сил:

$P_c$  - центробежная сила;  $P_s$  - сила гидравлического сопротивления;

$G$  - сила тяжести;  $P_B$  - выталкивающая сила;

$P_K$  - сила Кориолиса.

Принимая во внимание тот факт, что наибольшее влияние на характер размещения зерен оказывают силы  $P_c$  и  $P_s$ , исходя из условия равновесия сил, действующих на зерно, уравнение его движения запишется в следующем виде:

$$P_c = P_s; \quad (4.75)$$

$$V(\rho_3 - \rho)\omega^2 R = 6\pi r\eta v, \quad (4.76)$$

где

$r$  - радиус зерна;

$\rho_3$  - плотность зерна;

$\rho$  - плотность стали;

$\omega$  - частота вращения литейной формы;

$R$  - радиус вращения;

$v$  - скорость вращения зерна;

$\eta$  - динамическая вязкость стали;

$V$  - объем зерна.

Обозначив  $v = \frac{dR}{dt}$  и проведя необходимые преобразования, получим

$$V(\rho_3 - \rho)\omega^2 dt = 6\pi r \eta v \frac{dR}{R}. \quad (4.77)$$

Если принять, что  $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ , то с учетом  $\eta = \nu\rho$ , уравнение (4.77) преобразуется к виду:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_3 - \rho)\omega^2 dt = 6\pi r \nu\rho \frac{dR}{R}. \quad (4.78)$$

Интегрируя обе части уравнения (4.78), получим

$$\ln \frac{R}{R_0} = 0,22 \frac{r^2 (\rho_3 - \rho)\omega^2 t}{\nu\rho}. \quad (4.79)$$

или

$$\omega = \sqrt{\frac{\ln \frac{R}{R_0} \nu\rho}{0,22 r^2 (\rho_3 - \rho) t}}. \quad (4.80)$$

Если принять во внимание, что параметр  $t$  (с) - это время за которое кристаллизуется поверхностный слой металла, поступившего в литейную форму, то очевидно, что полученная зависимость (4.56) позволяет определить частоту вращения литейной формы, при которой зерно износостойкого материала под действием центробежных сил достигает вершины литейной формы, т. е. расстояние  $R_0$  от до  $R$ , преодолевая сопротивление расплавленного металла, обусловленное его вязкостью. При этом если учесть, что величины:  $\nu, \rho_3, \rho, r, t$  в каждом конкретном случае являются постоянными, то зависимость (4.80) можно привести к виду

$$\omega = k \sqrt{\ln \frac{R}{R_0}}, \quad (4.81)$$

где

$$k = \sqrt{\frac{\ln \nu\rho}{0,22 r^2 (\rho_3 - \rho) t}}. \quad (4.82)$$

и вычисляется для каждого конкретного случая.

Для того, чтобы получить заданное расположение зерен износостойкого материала, а именно слоем под набегающей гранью необходимо по известной формуле [16, 93]

$$m = c\rho_3 V_s, \quad (4.83)$$

где  $V_s$  - объем слоя;

$c$  - коэффициент, соответствующий концентрации зерен износостойкого материала в матрице центробежно-объемно-армированного композиционного материала (Ц-О-АКМ),

определить массу зерен и расположить поверхность литейной формы, формирующую набегающую грань, в плоскости, параллельной оси вращения, а вращение осуществлять в направлении от этой поверхности. Тогда под действием силы Кориолиса зерна износостойкого материала будут прижиматься к этой поверхности (рисунок 4.26).

Таким образом, после предварительного подогрева комплекта литейных форм до  $t=400\div 600^{\circ}C$  [170] их устанавливают на стол центробежной машины и при вращении с частотой, рассчитанной по формуле (4.56), в заданном направлении производят синхронную подачу расплавленного металла и зерен износостойкого материала. После заливки формы ее вращение продолжают до момента кристаллизации отливки.

Величина защитного слоя металла, а также соотношение объемов рабочей части зубьев ЦОАЗВ -  $V_1$  и объема армированной зоны  $V_2$  определялись экспериментально, путем испытаний зубчатых элементов в виде зубьев с диаметральной размером 20 мм, на способность воспринимать знакопеременные динамические нагрузки в условиях абразивной среды.

Результаты испытаний приведены в (таблицах 4.1 и 4.2). Критериями потери работоспособности зубков были выбраны следующие параметры: уменьшение высоты рабочей части зуба и размеры площадки притупления после 10 тысяч циклов нагружения с энергией удара 16 Дж.

Как видно из (таблиц 4.1 и 4.2), при незначительной по толщине армированной зоне  $V_2 = 0,15V_1$  и расположении ее верхней границы непосредственно на поверхности набегающей грани зуба, происходит значительное притупление и изнашивание вооружения по высоте. Это связано с тем, что при испытаниях неприкрытый основным металлом тонкий износостойкий армированный слой интенсивно выкрашивался, при этом большая часть неармированной рабочей головки зуба быстро изнашивалась.

При увеличении защитного слоя основного металла над верхней границей армированной зоны на 0,1-1,4 мм происходит незначительное снижение скорости износа зубьев ЦОАЗВ. Это доказывает, что защитный слой основного металла зуба в определенном диапазоне его толщины работает как демпфер, незначительно снижая ударные нагрузки, действующие на армированную твердым сплавом зону. При дальнейшем увеличении толщины демпфирующего слоя основного металла происходят снижение износостойкости набегающей грани зуба, и, как следствие, интенсивное его изнашивание.

При значительной по толщине армированной зоне  $V_2 = 0,55V_1$  и расположении ее верхней границы непосредственно на поверхности набегающей грани зуба также происходит значительное изнашивание ЦОАЗВ. Это связано с тем, что при большом объеме и концентрации зерен твердого сплава армированная зона сильно охрупчивается, при этом резко снижается способность ЦОАЗВ успешно воспринимать знакопеременные динамические нагрузки.

Таблица 4.1 – Зависимость износа по высоте от геометрических параметров зубьев

Расстояние от набегающей грани, мм	0	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
$V_2/V_1$	Износ рабочей части зубьев по высоте, %						
0,15	60	57	55	55	56	58	60
0,25	15	8	2	3	5	10	12
0,35	14	6	1	3	4	8	12
0,45	25	20	20	18	20	23	25
0,55	65	60	56	54	52	56	58

Таблица 4.2 - Влияние геометрии зубьев и армированной зоны на процесс притупления вооружения

Расстояние от набегающей грани, мм	0	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
$V_2/V_1$	Относительный износ площадки притупления						
0,15	6,3	6,0	5,7	5,7	5,8	6,1	6,3
0,25	1,6	1,4	1,05	1,03	1,05	1,5	1,56
0,35	1,53	1,3	1,01	1,04	1,05	1,4	1,56
0,45	2,6	2,1	2,1	1,9	2,1	2,4	2,6
0,55	7,0	6,3	5,8	5,6	5,4	5,8	6,1

В результате проведенных исследований были установлены основные конструктивные параметры ЦОАЗВ, армированного слоем со стороны набегающей грани зуба:

- толщина защитного слоя основного металла над армированной зоной со стороны набегающей грани зуба 0,4-1,0 мм;

- соотношение объема армированной твердым сплавом зоны к объему рабочей части зуба ЦОАЗВ  $V_2 = (0,25 \div 0,35) V_1$ .

Принятие во внимание этих параметров при изготовлении ЦОАЗВ позволит существенно повысить не только стойкость данного типа вооружения к знакопеременным динамическим нагрузкам, но и эффективность работы шарошечного бурового инструмента в целом [5].



#### 4.8 Методика определения модуля упругости армирующего композиционного материала, используемого для упрочнения вооружения шарошечного бурового инструмента

В настоящее время разработано большое количество методик, позволяющих определять модули упругости различных разнородных материалов. Однако не одна из них по целому ряду причин, не может быть использована с целью определения модуля упругости композиционных материалов, используемых для упрочнения вооружения шарошечного бурового инструмента. Одни методики позволяют определять модуль упругости только у достаточно однородных материалов, другие требуют использования образцов для испытаний с геометрическими размерами, которые не могут быть изготовлены чисто по технологическим причинам [164]. В связи с этим, была разработана методика, позволяющая определить модуль упругости практически для любого композиционного материала, используемого для упрочнения вооружения шарошечного бурового инструмента, основанная на методе приведенного поперечного сечения [93, 138].

Суть новой методики состоит в том, что сначала осуществляется изготовление опытных образцов, которые представляет собой стальные пластины, упрочненные с одной стороны износостойким композиционным материалом. При этом одним из главных условий является то, что пластина должна быть биметаллической, то есть иметь армированную зону и зону стальной основы, с четко разделяющей их границей (рисунок 4.32.1). При этом толщина основного металла  $m$  не должна превышать толщину армированного слоя  $a$  более чем в три раза, т. е.:  $1 \leq \frac{m}{a} \leq 3$ .

Испытуемый образец размещается на опорных твердосплавных стержнях 2, зафиксированных в стальной оправке 3. На поверхности испытуемого образца со стороны стальной основы в критическом сечении балки устанавливается тензодатчик. Изгибающие напряжения в образце достигаются за счет перемещения пуансона 1 вниз.

Наиболее эффективным методом расчета биметаллической балки, состоящей из разнородных материалов в условиях малых деформаций, считается метод приведенного поперечного сечения. Алгоритм расчета заключается в следующем. Для начала поперечное сечение исследуемого объекта, состоящего из двух разнородных материалов, преобразуют в эквивалентное ему поперечное сечение образца, состоящего из одного материала [93]. Далее это поперечное сечение, получившее название «приведенное поперечное сечение», рассчитывается по стандартной схеме как обычная однородная балка. При этом приведенное поперечное сечение должно быть полностью эквивалентно поперечному сечению испытуемого биметаллического образца, то есть иметь одинаковые показатели по расположению нейтральной оси и способности сопротивляться изгибу.

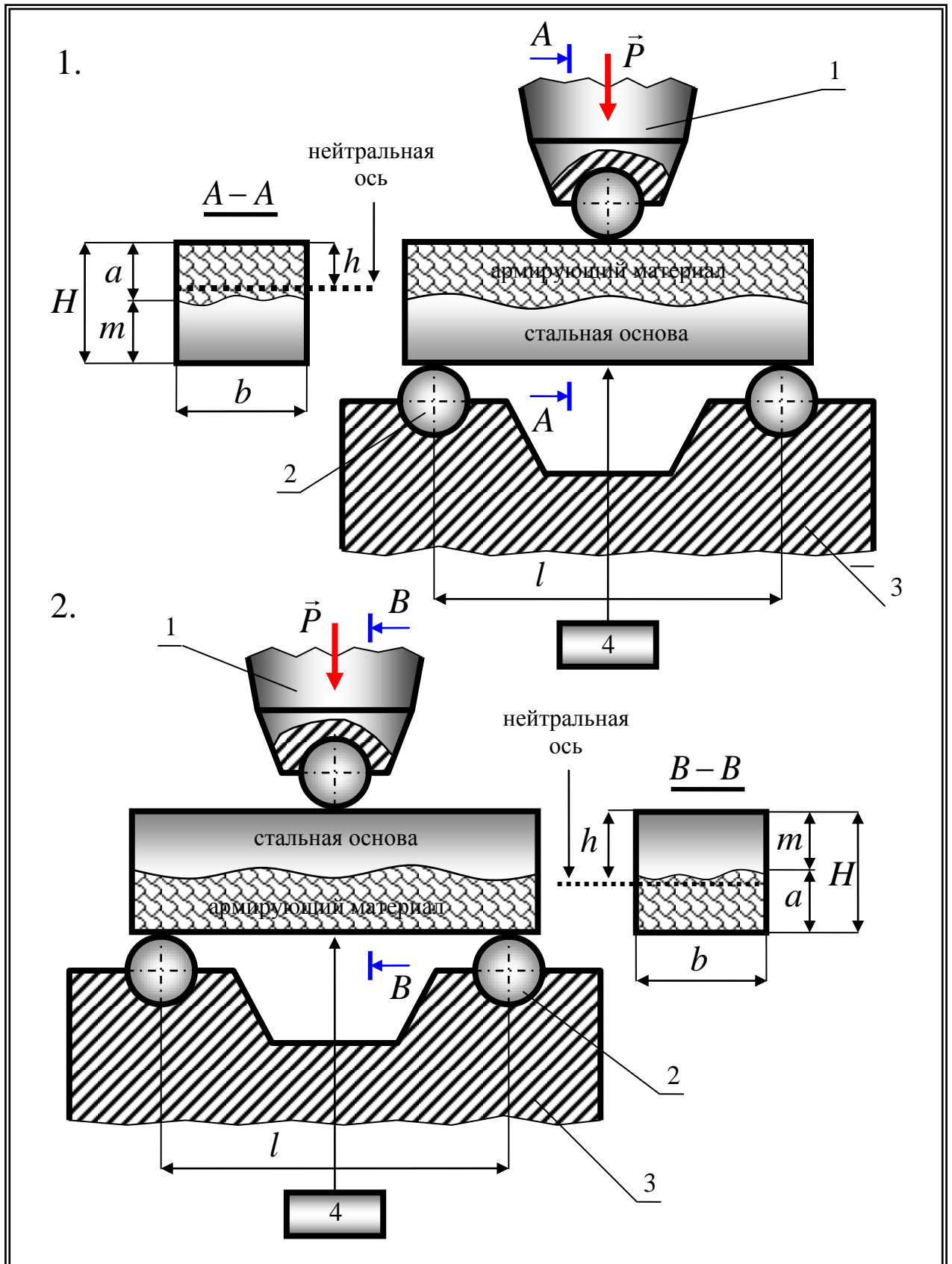


Рисунок 4.32 – Принципиальная схема определения модуля упругости (1) и допускаемого напряжения при изгибе (2) армирующего композиционного материала  
1 – пуансон; 2 – стержень опорный; 3 – оправка стальная; 4 – тензодатчик

Чтобы установить расположение нейтральной оси, необходимо определить центр тяжести приведенного поперечного сечения. Для этого сначала рассчитываются и суммируются статические моменты площадей для зон обоих материалов относительно верхней поверхности образца и затем делятся на общую площадь образца, в результате определяем положение нейтральной оси

$$h = \frac{\frac{a^2}{2} + (a + \frac{m}{2})fm}{a + fm}, \quad (4.84)$$

где

$a$  – толщина армированной зоны, мм;

$m$  – толщина зоны основного металла, мм;

$f$  – коэффициент.

Для определения момента инерции приведенного поперечного сечения используется следующая формула

$$I_{i\delta} = \frac{ba^3}{12} + ba(h - \frac{a}{2})^2 + f \frac{bm^3}{12} + fbm(h - a - \frac{m}{2})^2, \quad (4.85)$$

где

$b$  – ширина образца, мм;

$h$  – координата положения нейтральной оси, мм.

Далее определяется напряжение в критическом сечении (рисунок 4.32.1) со стороны стальной основы образца

$$\sigma = \frac{Pl(a + m - h)}{4I_{i\delta}} f, \quad (4.86)$$

где

$P$  – усилие изгиба, Н;

$l$  – величина пролета, м.

Подставляя выражение (4.84) и выражение (4.85) в (4.86) и получаем равенство

$$\sigma = \frac{Pl \left[ a + m - \left( \frac{afm + fm^2}{2(a + fm)} \right) \right] f}{\frac{ba^3 + fbm}{3} + 4ba \left( \frac{fm^2}{2(a + fm)} \right)^2 + 4fbm \left[ a + \frac{m}{2} - \left( \frac{afm + fm^2}{2(a + fm)} \right) \right]^2}. \quad (4.87)$$

Выражаем из (4.87) коэффициент  $f$ . После преобразований получаем уравнение относительно этого коэффициента  $f$

$$Af^3 + Bf^2 + Cf + D = 0, \quad (4.88)$$

где

$$\begin{cases} A = \sigma b m^5 - 6 P l m \\ B = 4 \sigma a^3 b m^2 + 6 \sigma a^2 b m^3 + 5 \sigma a b m^4 - 6 P l a^2 m - 18 P l a m^2 \\ C = 5 \sigma a^4 b m + 4 \sigma a^2 b m^3 + 6 \sigma a^3 b m^2 - 6 P l a^3 - 12 P l a^2 m \\ D = \sigma a^5 b \end{cases} \quad (4.89)$$

Решая это уравнение относительно  $f$ , важно понимать, что данный коэффициент не мнимый и не может иметь отрицательных значений. Далее исходя из следующего соотношения:

$$E_K = f E_S, \quad (4.90)$$

где

$E_S$  – модуль упругости стальной основы, Па;

$E_K$  – модуль упругости материала армированной зоны, Па;

определяется модуль упругости материала армированной зоны.

С целью получения более точных значений  $E_K$ , его величины были определены при различных изгибающих усилиях, а результаты усреднены.

Для ускорения расчетов и обработки полученных результатов была создана специальная программа. Ниже представлены необходимые данные для проведения расчета:

$P$  - величина изгибающего усилия, Н;

$\sigma$  - напряжение, возникающее на поверхности стальной основы, Па;

$a, b, m$  - различные геометрические размеры в опасном сечении, мм;

$E_S$  - модуль упругости стальной основы, Па;

$l$  - расстояние между опорными стержнями, м.

Разработанная методика, основанная на методе приведенного поперечного сечения, открывает новые возможности для определения модуля упругости практически любого композиционного материала, используемого для упрочнения рабочих граней зубчатого вооружения ШБИ.

Для определения различных значений модулей упругости Ц-О-АКМ согласно новой методике были изготовлены опытные образцы пластин со стальной основой из 20ХНЗА, армированные релитом с грануляцией от 0,9 до 1,2 мм.

Опытные образцы изготавливались в виде пластин определенных размеров:

- длиной  $l=0,004$  м;

- высотой  $H=0,001$  м;

- шириной  $b=0,0015$  м.

Геометрические параметры опытных образцов-пластин обусловлены и лимитированы спецификой технологии центробежного объемного армирования.

Все опытные образцы-пластины были подвергнуты стандартному технологическому процессу химико-термической обработки (ХТО), применяемому при производстве шарошек бурового инструмента. Затем осуществлялось всестороннее шлифование пластин с целью обеспечить плоскопараллельность основных установочных поверхностей, упростить установку и повысить точность работы тензодатчика.

Были испытаны десять образцов с сорока процентной концентрацией зерен релита в армированной зоне, а также десять образцов с шестидесяти процентной концентрацией зерен релита в армированной зоне. При этом нагрузки изменялись в диапазоне от  $5 \cdot 10^3$  Н до  $12 \cdot 10^3$  Н.

Полученные в результате экспериментов значения были подвергнуты компьютерной обработке [93, 162].

В конечном итоге были установлены значения модулей упругости Ц-О-АКМ:

- с сорока процентной концентрацией твердого сплава

$$E_{40\%} = 2,643 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

- с шестидесяти процентной концентрацией твердого сплава

$$E_{60\%} = 2,813 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Рассчитанные значения модуля упругости Ц-О-АКМ подтвердили предположения о том, что данные характеристики не могут рассчитываться по формуле Планка [85]

$$E_K = \lambda E_1 + (1-\lambda) E_2,$$

где

$E_1$  – модуль упругости твердого сплава, МПа;

$E_2$  – модуль упругости стальной основы, МПа;

$\lambda$  – объемная концентрация твердого сплава в композите, %.

Таким образом, при проектировании новой геометрии центробежно-объемно-армированного вооружения, с целью повышения точности расчетов на прочность зубьев шарошек, имеющих другую стальную основу и армирующий материал, необходимо при помощи описанной выше методики определить модуль упругости материала армированной зоны.

Аналогично могут определяться модули упругости для любых наплавочных композиционных материалов, используемых для поверхностного упрочнения рабочих поверхностей зубчатого вооружения шарошечного бурового инструмента.

#### 4.9 Методика определения допускаемого напряжения при изгибе армирующего композиционного материала

Дальнейшим продолжением исследований, направленных на повышение качества стального армированного зубчатого вооружения ШБИ, является необходимость разработки методики, позволяющей определять допускаемые напряжения при изгибе для любого износостойкого композиционного материала, используемого для упрочнения стального вооружения [93].

С целью решения этой задачи, за основу была выбрана одна из существующих методик, позволяющая определять допускаемые напряжения при изгибе твердых сплавов экспериментальным путем. Суть методики сводится к следующему.

Опытный образец исследуемого композиционного материала с соотношением геометрических размеров  $H/l = 1:5$  размещается на опорных твердосплавных стержнях 2, зафиксированных в стальной оправке 3 (рисунок 4.32.2). Изгибающее усилие создается пуансоном 1 по середине образца по трехточечной схеме свободно опертой балки.

Нарастающее нагружение опытного образца композиционного материала осуществляется до момента, когда происходит резкое падение нагрузки на пуансоне. Величина нагрузки, предшествующая усилию разрушения, принимается за максимально допустимую и фиксируется.

Далее, производится математический расчет допускаемого напряжения при изгибе, возникающего в композиционном материале вследствие действия максимальной нагрузки

$$[\sigma] = \frac{P_{\max} l(H-h)}{4I}, \quad (4.91)$$

где

$P_{\max}$  – максимальное изгибающее усилие, Н;

$l$  – величина пролета, м;

$I$  – момент инерции опасного сечения, м<sup>4</sup>;

$(H-h)$  – координата нейтральной оси от нижней поверхности образца, м.

В качестве примера определим допускаемое напряжение при изгибе для Ц-О-А-КМ, как наиболее сложного для проведения подобных исследований, вследствие технологии его изготовления.

Исследования прочностных характеристик центробежно-объемно-армированного композиционного материала осуществлялись на двух типах образцов. В первом случае опытные образцы были целиком изготовлены из композиционного материала и рассчитывались по форму-

ле (4.91). Во втором - представляли биметаллические пластины и рассчитывались аналогично методике представленной в пункте 4.8.

Для определения различных значений допускаемых напряжений при изгибе центробежно-объемно-армированных композиционных материалов согласно новой методике были изготовлены опытные образцы пластин со стальной основой из 20ХН3А, армированные релитом с грануляцией от 0,9 до 1,2 мм.

Опытные образцы изготавливались в виде пластин определенных размеров:

- длиной  $l=0,004$  м;
- высотой  $H=0,001$  м;
- шириной  $b=0,0015$  м

специально или за счет переделки пластин с центробежно-объемно-армированным композиционным материалом, прежде использованных как опытных образцов согласно методике определения эффективного модуля упругости.

Были испытаны десять образцов с сорока процентной концентрацией зерен релита в армированной зоне, а также десять образцов с шестидесяти процентной концентрацией зерен релита в армированной зоне. Полученные в результате экспериментов значения были подвергнуты компьютерной обработке [93, 162].

В конечном итоге были установлены значения допускаемых напряжений при изгибе ЦО-АКМ:

- с сорока процентной концентрацией твердого сплава:

$$[\sigma]=1,401 \text{ МПа};$$

- с шестидесяти процентной концентрацией твердого сплава:

$$[\sigma]=1,394 \text{ МПа}.$$

Проведенные исследования и определенные на их основе значения допускаемого напряжения при изгибе центробежно-объемно-армированных композиционных материалов с различными концентрациями зерен твердого сплава в дальнейшем позволят проводить более точные расчеты на прочность ЦОАЗВ ШБИ.

Аналогично могут определяться допускаемые напряжения при изгибе для любых наплавочных композиционных материалов, используемых для поверхностного упрочнения рабочих поверхностей зубчатого вооружения шарошечного бурового инструмента.

Таким образом, разработанные методики по определению наиболее значимых физико-механических характеристик композиционных материалов, используемых при упрочнении вооружения шарошечного бурового инструмента, позволят существенно повысить качество проектирования геометрии его вооружения.

#### 4.10 Экспресс-методика расчета на прочность армированного зубчатого вооружения по допускаемым напряжениям изгиба

Упрочнение стального зубчатого вооружения шарошек бурового инструмента различными армирующими композиционными материалами позволяет существенно повысить износостойкость вооружения и как следствие эффективность шарошечного бурового инструмента. Однако многолетний опыт эксплуатации шарошечного бурового инструмента со стальным армированным вооружением свидетельствует о том, что в условиях длительного знакопеременного динамического нагружения оно подвержено скалыванию и быстрому изнашиванию.

Поэтому при проектировании и разработке новых конструкций вооружения шарошечного бурового инструмента необходимо уделять особое внимание расчету геометрических параметров зубьев не только с учетом прочности стальной основы, но и физико-механических характеристик армирующих композиционных материалов.

Для решения данной задачи рассмотрим стальной зуб вооружения, упрочненный центробежно-объемно-армированным композиционным материалом (рисунок 4.33), как наиболее сложный в сравнении с поверхностно-армированным вооружением с точки зрения осуществления прочностных расчетов. Как отмечалось ранее, метод приведенного поперечного сечения является одним из самых удобных способов проведения быстрых прочностных расчетов зубьев вооружения, состоящего из стальной основы и армированного композиционного материала. Суть метода была детально расписана в пункте 4.8.

Для проведения расчета на прочность стального армированного зуба вооружения шарошки по допускаемому напряжению при изгибе нужно условно разделить его на множество поперечных сечений и определить их геометрические характеристики. Количество сечений зависит как от геометрических параметров зуба, так и армированных поверхностей.

С целью проведения расчета ЦОАЗВ новой разработанной конструкции, обладающего наиболее сложной геометрией армированной зоны, разделим один из зубьев вооружения на двадцать пять поперечных сечений (рисунок 4.33) и вычислим геометрические характеристики для каждого из них.

Изменение толщины стального армированного зуба вооружения в данном случае подчиняется следующему закону:

$$m = 2tg \frac{\alpha}{2} z + k, \quad (4.92)$$

где  $m$  – толщина зуба в сечении –  $Z$ , м;  $z$  – расстояние от вершины зуба до рассчитываемого сечения, м;



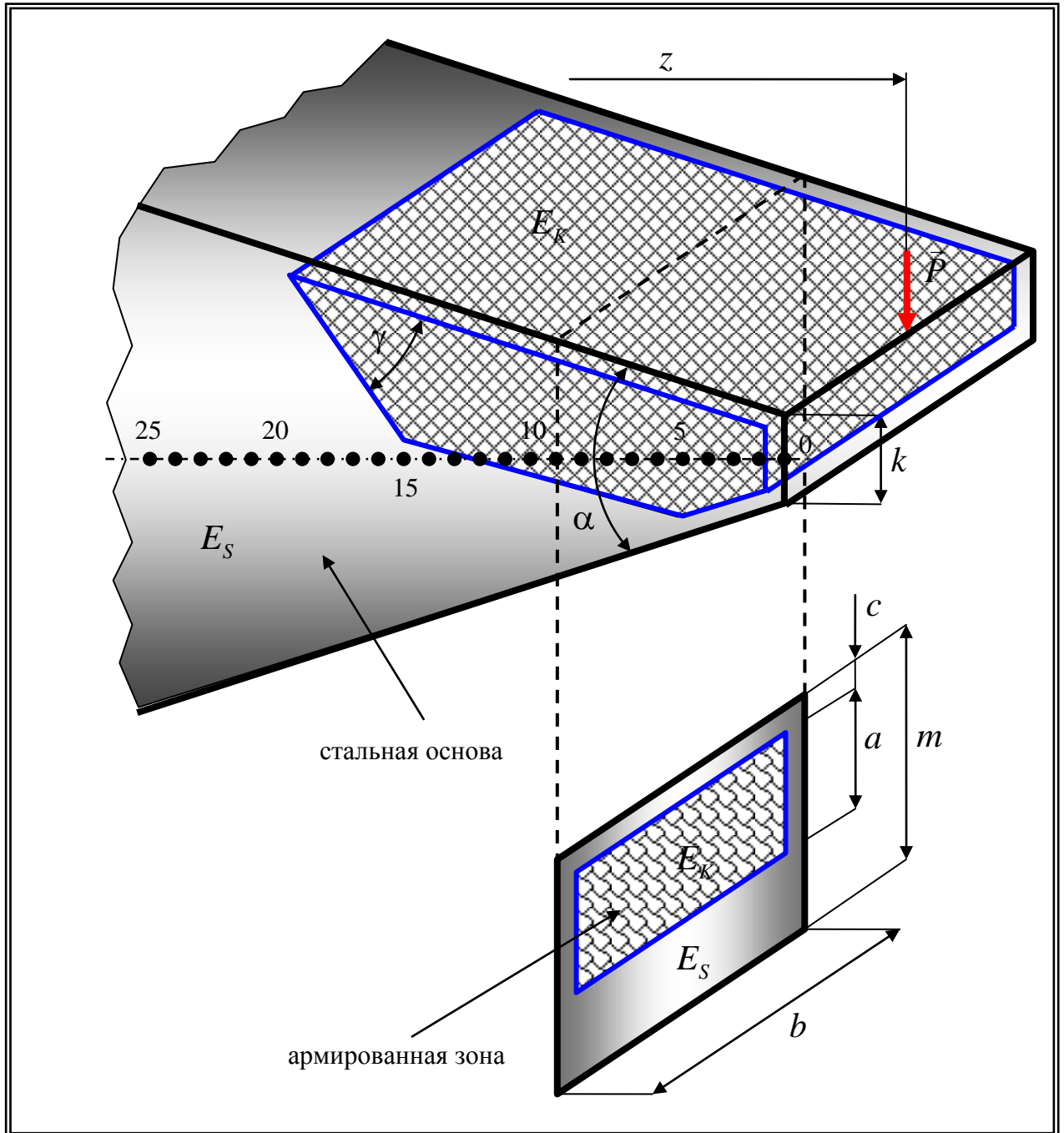


Рисунок 4.33 - Схема для расчета центробежно-объемно-армированного зубчатого вооружения по допускаемым напряжениям изгиба

$\alpha$  – угол заострения зуба, град.,

и справедливо для всех без исключений поперечных сечений

Тогда в интервале  $0 < Z < 1$  момент инерций каждого сечения определяется как:

$$I_{0-1} = \frac{bm^3}{12}, \quad (4.93)$$

где

$b$  – ширина зуба, м.

В интервале  $1 < Z < 4$  для каждого из сечений нужно определить координату нейтральной оси, отсчитываемую от верхней грани зуба, по формуле [93]

$$h_{1-4} = \frac{a \left( c + \frac{a}{2} \right) + \frac{E_S}{E_K} \left( \frac{m^2 - 2ac - a^2}{2} \right)}{a + \frac{E_S}{E_K} (m - a)}, \quad (4.94)$$

где

$c$  – толщина демпферного слоя стальной основы, м;

$a$  – толщина слоя, армированного твердым сплавом, м;

$E_S$  – модуль упругости стальной основы, Па;

$E_K$  – модуль упругости Ц-О-АКМ, Па.

В указанном интервале толщина слоя армированной зоны определяется исходя из следующего соотношения:  $\alpha = m - 2\tilde{n}$ ; (4.95)

Момент инерции для каждого сечения этого участка определяется по формуле

$$I_{1-4} = \frac{E_S bc^3}{12E_K} + \frac{E_S bc}{E_K} \left( h_{1-4} - \frac{c}{2} \right)^2 + \frac{ba^3}{12} + ba \left( h_{1-4} - \frac{a}{2} - c \right)^2 + \frac{E_S b(m-c-a)^3}{12E_K} + \frac{E_S b(m-c-a)}{E_K} \left( h_{1-4} - \frac{(m-c-a)}{2} \right)^2. \quad (4.96)$$

В интервале  $4 < Z < 15$  рассчитываются величины  $h_{4-15}$  и  $I_{4-15}$ , согласно формулам (4.94) и (4.96), учитывая то, что на данном интервале толщина слоя постоянна:

$$\alpha = const = a_4. \quad (4.97)$$

В интервале  $15 < Z < 19$  рассчитываются  $h_{15-19}$  и  $I_{15-19}$ , исходя из формул (4.94), (4.96), учитывая то, что на данном интервале толщина слоя изменяется по следующему закону

$$a = \frac{t \sin \beta}{\cos \left( \frac{\alpha}{2} + \beta \right) \cos \frac{\alpha}{2}}, \quad (4.98)$$

где  $t$  – изменяющаяся вспомогательная величина:

<i>t</i>	4	3	2	1	0
<i>z</i>	15	16	17	18	19

В интервале  $19 < Z < 25$  момент инерций каждого сечения определяется как

$$I_{19-25} = \frac{bm^3}{12}. \quad (4.99)$$

Определив для каждого поперечного сечения моменты инерций, можно рассчитать напряжения, возникающие в любой зоне стального армированного зуба вооружения вследствие воздействия на него эксплуатационных нагрузок

В этом случае определение нормальных напряжений при изгибе на поверхности армированной твердым сплавом грани зуба вооружения осуществляется как

$$\sigma_z = \frac{Pzy_z}{I_z}, \quad (4.100)$$

где  $I_z$  - момент инерции в рассматриваемом сечении  $z$ ,  $m^4$ ;

$y_z$  - расстояние от точки определения напряжения до нейтральной оси, м.

При определении напряжений, возникающих на противоположной не армированной стальной грани зуба, нужно напряжение, определенное в соответствии с формулой (4.100), умножить на соотношение  $E_s / E_k$ .

После вычисления нормальных напряжений изгиба на набегающей поверхности объемно (поверхностно) - армированного зуба вооружения, возникающих вследствие воздействия на него изгибающих нагрузок, далее выявляется опасное сечение, т. е. сечение в котором на набегающей поверхности зуба возникает максимальное напряжение изгиба. Если эта величина больше, чем допускаемая (для конкретного армирующего материала), в геометрию рабочей части зуба и зоны армирования вносятся определенные коррективы. Так, при  $\sigma_{\max} \ll [\sigma]$  увеличивают вылет и уменьшают площадь площадки притупления и угол заострения зуба. Соответственно при  $\sigma_{\max} \gg [\sigma]$  уменьшают вылет и увеличивают размеры площадки притупления и угол заострения зуба.

Если принять данный расчет как решение «прямой» задачи, т. е. позволяющей определять геометрию разрабатываемого центробежно-объемно (или поверхностно)-армированного вооружения в зависимости от эксплуатационных требований к породоразрушающему инструменту, можно осуществлять и обратный расчет. Решение «обратной» задачи позволяет рассчитывать рекомендательные параметры режима бурения при использовании шарошечного бурового инструмента с определенной геометрией зубчатого вооружения.

#### 4.11 Определение циклической прочности центробежно-объемно-армированного вооружения шарошечного бурового инструмента

При бурении нефтяных и газовых скважин шарошечным буровым инструментом зубья его вооружения подвергаются значительным циклическим знакопеременным динамическим нагрузкам. Нагрузки такого рода, наряду с абразивным изнашиванием, в большей или меньшей степени являются преобладающими как при бурении твердых и средних, так и мягких пород.

При эксплуатации поверхностно-армированного вооружения ударно-усталостная стойкость которого незначительна, вследствие наличия большого количества концентраторов напряжений, обусловленных сильной неоднородностью армирующего композиционного материала и значительной концентрацией твердосплавного компонента в зоне армирования, происходят отслоение и скалывание армированного слоя (рисунок 1.11), что приводит к преждевременному износу вооружения.

В процессе работы ШБИ зубья его вооружения испытывают значительные динамические знакопеременные нагрузки, циклическое воздействие которых приводит к зарождению единичных, а затем и сетчатых микротрещин в твердосплавном покрытии. При этом стальная основа зубьев значительно пластичней, чем армированная твердым сплавом поверхность, вследствие этого при деформациях зубьев от воздействия сил реакции забоя твердосплавное покрытие интенсивно скалывается. Как правило, разрушение начинается в вершинной части зуба и далее распространяется до его основания [85, 86].

При работе инструмента поверхностный, армированный твердым сплавом износостойкий слой скалывается, что приводит к обнажению мягкой сердцевины зуба, в результате чего значительно увеличивается скорость износа зубьев вооружения посредством абразивного изнашивания. При этом зубчатое вооружение округляется и притупляется, в результате чего существенно снижается удельное давление зубьев на поверхность забоя, что неминуемо приводит к снижению механической скорости бурения и проходки на инструмент.

Во многих случаях происходит и другой сценарий разрушения зубчатого вооружения ШБИ, когда в поверхностном слое зарождаются микротрещины, которые при циклических и продолжительных по времени нагрузках проникают глубоко в стальную основу зуба и приводят к его полному одномоментному разрушению (рисунок 1.12).

Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что циклические знакопеременные динамические нагрузки приводят к разрушению зубчатого вооружения шарошек при напряжениях, значительно меньших предела прочности материалов, из которых оно изготовлено. Это так называемое «усталостное» разрушение, когда материалы (стальная основа и армиру-

щий износостойкий слой) зуба как бы «устают» под действием многократно повторяющихся нагрузок, приводя к частичному или полному разрушению вооружения.

Усталостное разрушение достаточно сложный и еще до конца не изученный процесс. Одной из главных причин данного вида разрушения является зарождение и развитие трещин как в области основного металла, так и армированной зоне.

В основном механизм усталостного разрушения определяется неоднородностью структуры материалов вооружения (различие размеров, форм, ориентации соседних зерен металла; твердосплавного компонента; наличие включений шлаков, различных примесей; дефекты кристаллической решетки, поверхностные дефекты материала и т. д.).

Указанная неоднородность при переменных напряжениях, возникающих на границах зерен твердого сплава и стальной основы, отдельных включений, а также в районах микро-пустот и различных дефектов, приводит к возникновению концентрации напряжений, которая в свою очередь становится причиной микропластических деформаций сдвига. Этот процесс сопровождается появлением на поверхностях зерен полос скольжения, и осуществляется накопление сдвигов, проявляющееся в виде образования микробугров и впадин-экструзий и интрузий. Далее происходит перерождение сдвигов в микротрещины, с последующим их ростом и слиянием. На заключительном этапе появляются несколько макротрещин, которые интенсивно развиваются. Края трещин под воздействием переменных нагрузок притираются друг о друга, в связи с чем зоны роста трещин отличаются гладкими поверхностями. В процессе роста трещин происходит уменьшение поперечного сечения зуба, что приводит к его существенному ослаблению, и, в конце концов, происходит его внезапное разрушение.

Усталостная прочность различных материалов зубчатого вооружения при циклически повторяющихся знакопеременных нагрузках во многом определяется характером изменения напряжений во времени, то есть от периодичности приложения нагрузки.

Периодической нагрузкой называют переменную нагрузку, которая имеет установившийся во времени характер изменения, при этом повторяется через определенные промежутки времени. Ее характеризует цикл напряжений, то есть совокупность всех значений изменяющихся напряжений в течение одного периода, в процессе которого происходит изменение нагрузки.

Цикл напряжений, как правило, описывается синусоидальным законом (рисунок 4.34). При этом прочность материалов под воздействием циклических нагрузок в основном зависит не от законов изменения напряжений, а от величин минимального и максимального напряжений в цикле.

Как правило, для циклов напряжений свойственны несколько независимых основных характеристик:

$\sigma_{\max}$  - максимальные напряжения;

$\sigma_{\min}$  - минимальные напряжения;

$\sigma_m$  - средние напряжения (определяемые полусуммой наименьшего и наибольшего напряжений)

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \quad (4.101)$$

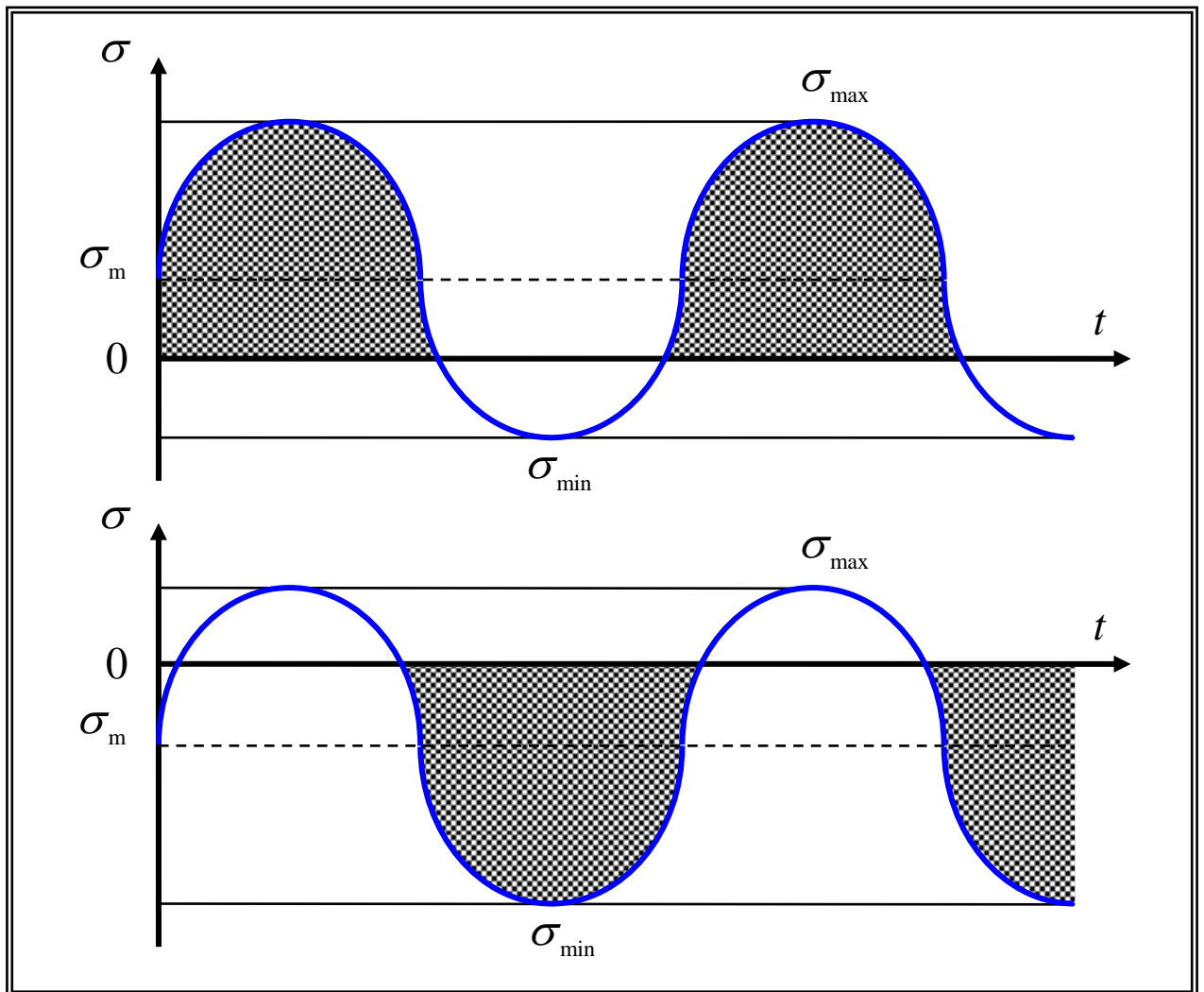


Рисунок 4.34 - Синусоидальный закон изменения напряжений во времени

$R$ -коэффициент асимметрии цикла напряжений (отношение наименьшего и наибольшего напряжений цикла)  $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$  (4.102).

Работа шарошечного бурового инструмента сопровождается восприятием зубьями его вооружения асимметричного цикла напряжений, то есть когда максимальные и минимальные напряжения не равны по абсолютной величине ( $\sigma_{\max} \neq -\sigma_{\min}$ ). При этом асимметричный цикл может быть знакопеременным, то есть - максимальное и минимальное напряжения не равны по абсолютной величине и противоположны по знаку ( $R < 0; R \neq -1$ ).

Технология центробежного объемного армирования позволяет создавать буровой инструмент с самой сложной геометрической формой вооружения и одновременно армированного не только по всему, но и требуемому для каждого конкретного случая проведения буровых работ объему рабочей части вооружения (рисунок 4.35). При этом ЦОАЗВ имеет большую стойкость к знакопеременным динамическим нагрузкам в сравнении с поверхностно-армированным, особенно при бурении высокоабразивных пород [112].

Как отмечалось ранее, важным этапом при проектировании ШБИ с ЦОАЗВ является осуществление расчета его геометрических характеристик на основе различных показателей прочности. Одним из них является анализ циклической прочности центробежно-объемно-армированного вооружения, учитывающий физико-механические характеристики, не только стальной основы, но и Ц-О-АКМ.

Как правило, при проведении анализа циклической прочности, основанного на том, чтобы определить допускаемое число циклов на основе заданных амплитуд напряжений или по заданному числу циклов допускаемые амплитуды напряжений, используются:

- расчетные кривые усталости, характеризующие зависимость допускаемых амплитуд условных напряжений и допускаемым числом циклов нагружения;
- формулы, связывающие допускаемые амплитуды напряжений и допускаемое число циклов, когда возникает необходимость проведения уточненных расчетов допустимо возможного числа циклов или амплитуд напряжений или в случае невозможности применения расчетных кривых.

Амплитуды эксплуатационных напряжений не должны превышать допускаемые амплитуды напряжений  $[\sigma_{aF}]$ , полученных для требуемого числа циклов  $N$ . При заданной амплитуде напряжения число эксплуатационных циклов  $N$  никогда не должно быть больше, чем число допускаемых циклов  $[N_0]$ .

В случаях, когда процесс включает в себя целый ряд циклов, каждый из которых характеризуется своей собственной амплитудой напряжений  $(\sigma_{aF})_i$  и собственным числом циклов  $N_i$ , то необходимо, чтобы выполнялось условие прочности по накопленным усталостным повреждениям.

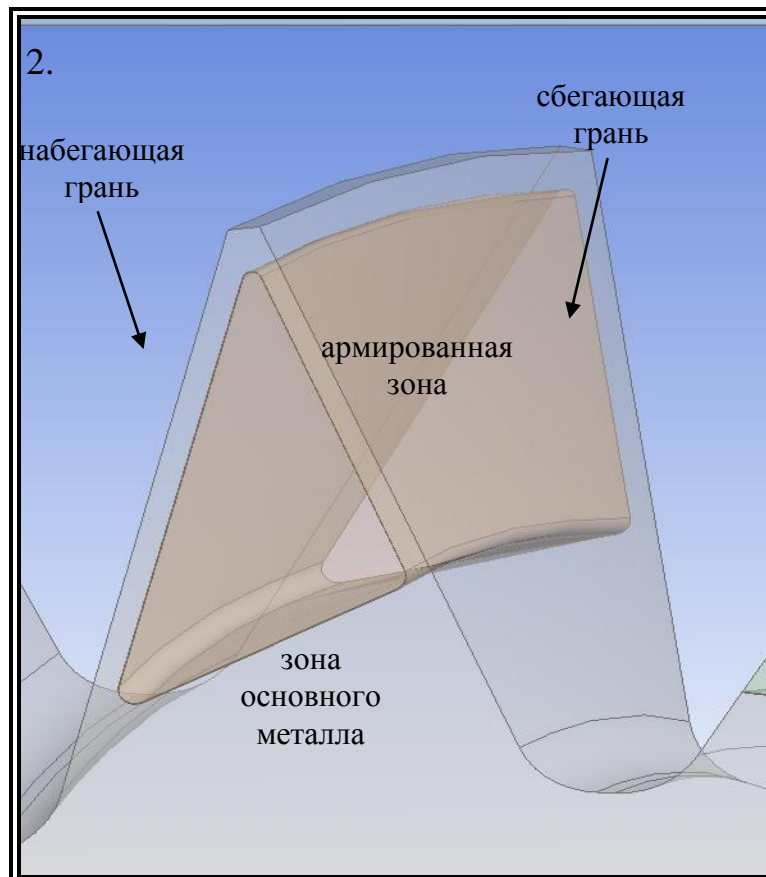
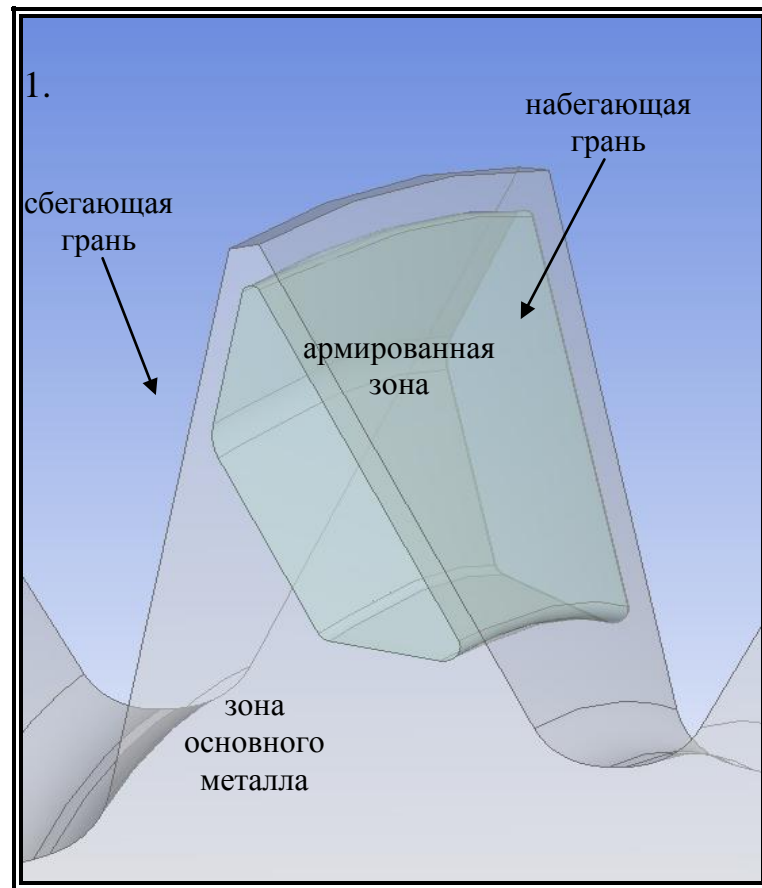


Рисунок 4.35 - Варианты геометрии армированной зоны



Для легированных и углеродистых сталей при температурах в интервале  $20^0 - 350^0\text{C}$  и значениями [49]

$$\frac{R_{p0,2}^T}{R_m^T} \leq 0,7; R_m^T \geq 450 \text{ МПа}; Z^T \geq 32\%; E^T = 195 \text{ ГПа},$$

на (рисунок 4.36) представлена расчетная кривая усталости.

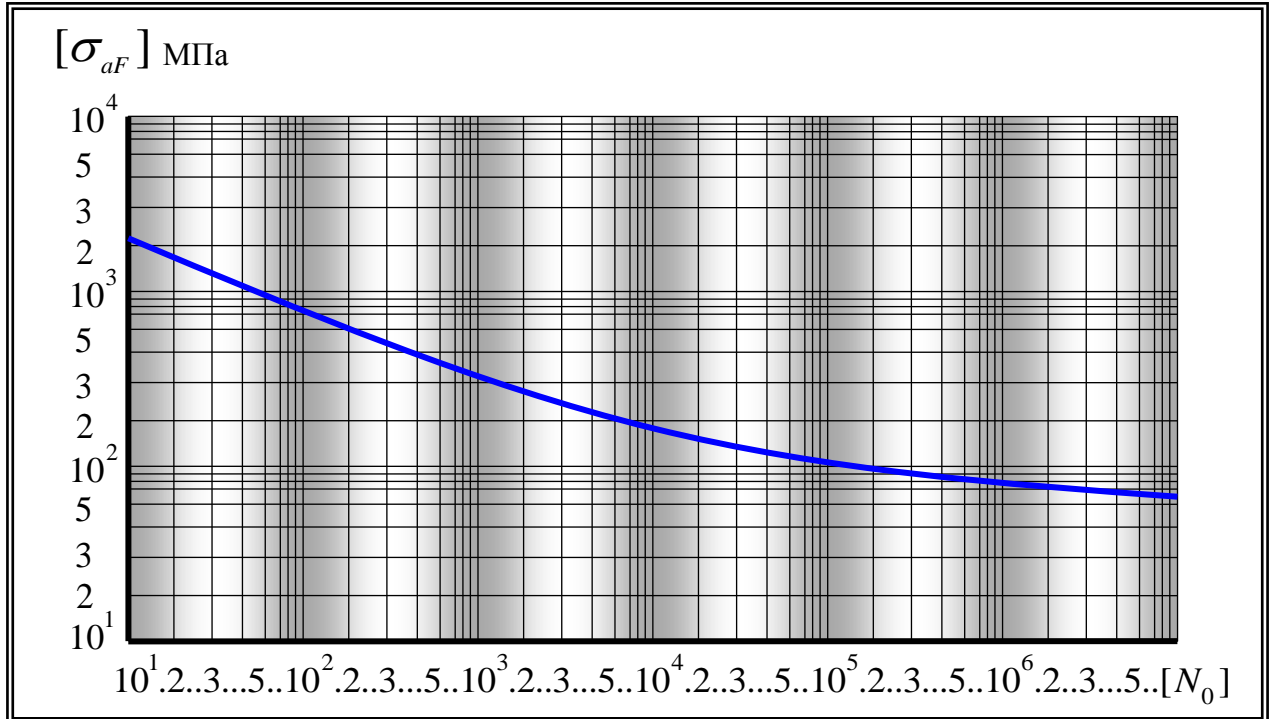


Рисунок 4.36 - Расчетная кривая усталости углеродистых и легированных сталей

$$\text{с } \frac{R_{p0,2}^T}{R_m^T} \leq 0,7 \text{ до } T = 350^0\text{C}$$

Эта зависимость была установлена с учетом максимальных коэффициентов запаса и может быть использована при коэффициенте асимметрии циклов напряжений  $r \leq 0$ .

Допускаемую амплитуду условного упругого напряжения для заданных температур можно определять умножением значения  $[\sigma_{aF}]$  по расчетной кривой (рисунок 4.36) на отношение модуля упругости при заданной температуре к модулю упругости при максимальной температуре применения соответствующей расчетной кривой.

Допускаемое количество циклов или допускаемая амплитуда упругого условного напряжения для сталей с соотношением  $\frac{R_{p0,2}^T}{R_m^T} \leq 0,7$  при  $[N_0] \leq 10^{12}$  определяются по формулам

$$\left\{ \begin{aligned} [\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e_c^T}{n_\sigma (4[N_0])^m} + \frac{R_c^T}{n_\sigma \left[ (4[N_0])^{m_e} + \frac{1+r}{1-r} \right]}, \\ [\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e_c^T}{(4n_N [N_0])^m} + \frac{R_c^T}{\left[ (4n_N [N_0])^{m_e} + \frac{1+r}{1-r} \right]}, \end{aligned} \right. \quad (4.103)$$

где

$r$  - коэффициент, учитывающий асимметрию циклов напряжений;

$m, m_e$  - характеристики материала;

$n_\sigma, n_N$  - коэффициенты, учитывающие запас прочности от напряжений и числа циклов;

$R_c^T$  - прочностная характеристика, равная

$$R_c^T = R_m^T (1 + 1,4 \times 10^{-2} Z^T); \quad (4.104)$$

$e_c^T$  - характеристика пластичности, зависящая от значения  $Z_c^T$ , определяется по формуле:

$$e_c^T = 1,15 \lg \frac{100}{100 - Z_c^T} - \frac{(\sigma_F)_{\max} - R_{p0,2}^T}{2E^T}. \quad (4.105)$$

или при  $(\sigma_F)_{\max} < R_{p0,2}^T$ , по формуле

$$e_c^T = 1,15 \lg \frac{100}{100 - Z_c^T}. \quad (4.106)$$

Характеристики  $E^T, Z^T, R_m^T$  принимаются равными минимальным значениям в интервале рабочих температур и с учетом процесса старения материала [49].

Поэтому для проведения расчетов нужно знать цикличность и диапазон напряжений, которые возникают в зубьях вооружения при работе ШБИ на забое. В работе [114] было исследовано напряженно-деформируемое состояние центробежно-объемно-армированного зубчатого вооружения и в особенности распределение напряжений, возникающих в армированной зоне, в виду того, что именно она в основном определяет работоспособность и долговечность зубьев вооружения ШБИ не только с позиции его износостойкости, но и возможности успешно противостоять знакопеременным динамическим нагрузкам. На (рисунок 4.37) представлены зависимости, позволяющие оценить характер распределения напряжений по высоте зуба вооружения ШБИ для двух геометрий центробежно-объемно-армированных зон.

Как было определено ранее, работа ведомых венцов зубчатого вооружения ШБИ сопровождается его пробуксовкой относительно поверхности разрушаемой породы. В этом случае набегающая грань воспринимает основную нагрузку, связанную с разрушением породы забоя, как под воздействием осевой нагрузки на долото, так и от крутящего момента. Тем не менее результаты проведенных расчетов свидетельствуют о том, что в зубьях максимальные напряже-

ния возникают не на набегающей грани, а на сбегающей (рисунок 4.37). При этом цикл напряжений, возникающих в армированной зоне - пульсирующий (от нулевой), то есть, минимальное напряжение равно нулю.

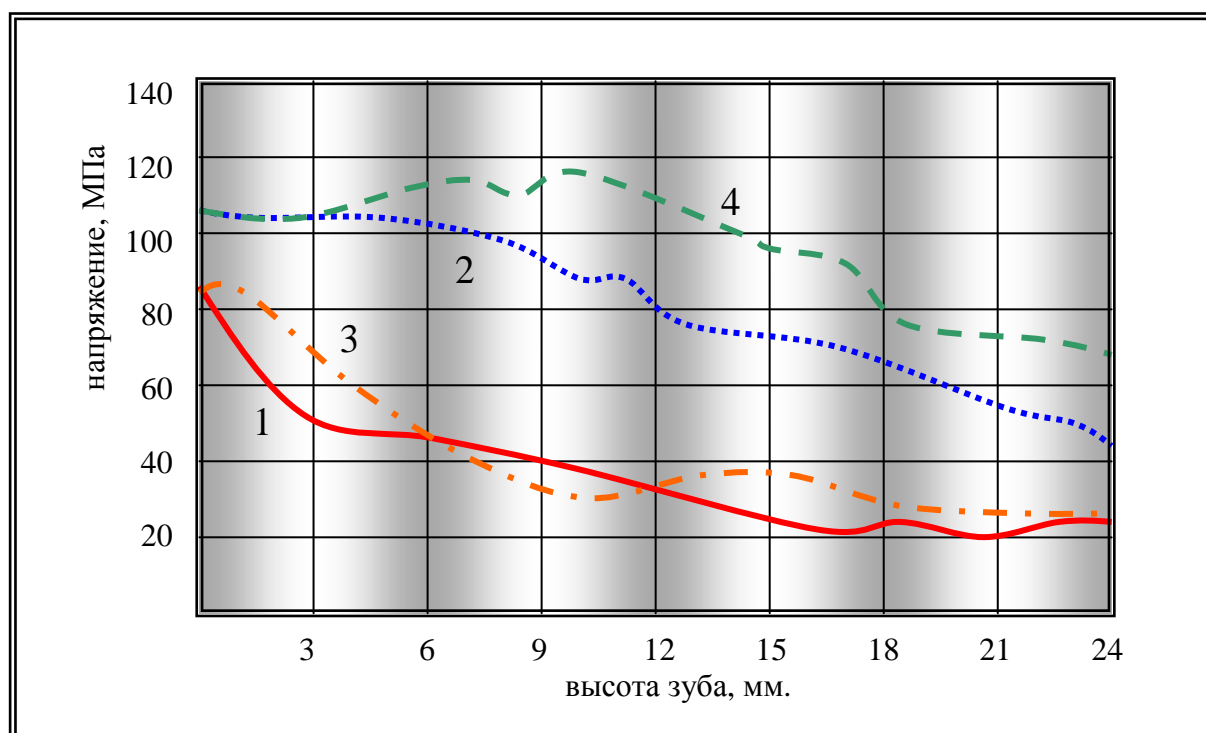


Рисунок 4.37 - Распределение напряжений по высоте армированной зоны

1 – 1-й вариант зоны армирования со стороны грани набегающей; 2 – 1-й вариант зоны армирования со стороны грани сбегающей; 3 - 2-й вариант зоны армирования со стороны грани набегающей; 4 - 2-й вариант зоны армирования со стороны грани сбегающей

Согласно (рисунок 4.37) напряжения, возникающие в армированной зоне со стороны набегающей грани для обеих геометрий армированных зон достаточно похожи не только по величинам, но и распределению. Напряжения в армированных зонах со стороны сбегающей грани имеют различия. Если в при вершинной зоне они практически одинаковы, то по мере приближения к основанию зуба напряжения в зубьях со вторым вариантом армированной зоны выше, чем для первого варианта. Вероятно, объясняется это тем, что при удалении от вершины зуба, на определенном расстоянии, зона армирования по 1-му варианту со стороны сбегающей грани зуба заканчивается раньше, чем по 2-му.

Таким образом, расчеты циклической прочности зубчатого вооружения ШБИ можно осуществлять для 2-х граней зуба, имеющего первую форму армированной зоны, а также для сбегающей грани зуба с 2-й формой армированной зоны. Данные и результаты расчетов приведены в (таблице 4.3).

Таблица 4.3 – Результаты расчетов

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Величина		
			1-вариант набегающая	1-вариант сбегающая	2-вариант сбегающая
<b>ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ</b>					
Предел текучести Ц-О-АКМ при минимальной температуре цикла	$R_{p0,2}^{T\min}$	МПа	1350		
Относительное изменение поперечного сечения вершины зубьев	$Z^T$	%	40		
Модуль упругости ЦОАКМ	$E^T$	МПа	270000		
Наибольшее напряжение полуцикла	$(\sigma_L)_I$	МПа	85	105	120
Наименьшее напряжение полуцикла	$(\sigma_L)_h$	МПа	0,0		
<b>РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА</b>					
Показатель упрочнения	n	-	0,19		
Предел пропорциональности	$R_{pe}^T$	МПа	114,5		
Характеристика пластичности	$e_m^T$	-	0,26		
Равномерное сужение	$Z_m^T$	%	18,23		
Характеристика прочности	$R_C^T$	МПа	574,08		
Предел выносливости	$R_{-1}^T$	МПа	147,2		
Показатель степени	m	-	0,5		
Показатель степени	$m_e$	-	0,078		
Гарантированное изменение геометрии	$Z_C^T$	%	40		
Приведенное условное упругое напряжение	$(\sigma_F)_{\max}$	МПа	45,00		
Характеристика пластичности	$e_C^T$	-	0,255		
Характеристика пластичности	$e_C^T$	-	0,200		
Амплитуда приведенных напряжений без учета концентрации напряжений	$(\sigma_a)$	МПа	45,00		
Коэффициент концентрации напряжений	$K_F$	-	5,3895		
Амплитуда условного упругого приведенного напряжения	$(\sigma_{aF})$	МПа	242,53		
Коэффициент асимметрии цикла	r	-	-0,78		
Принятый коэффициент асимметрии цикла	r	-	-0,78		
Допускаемое число циклов	$[N_0]$	-	51870	43770	39350

Чтобы экспериментальным путем определить циклическую прочность вооружения бурового инструмента, были проведены стендовые сравнительные испытания стойкости к ударно-абразивному износу двух его типов: поверхностно - и объемно-армированного с различными формами армированной зоны. Этот вид нагружения позволяет с достаточной точностью смодели-

лизовать работу зубчатого вооружения ШБИ в процессе бурения. Зубчатые элементы вооружения изготавливались как по технологии поверхностного армирования, так и ЦОА, с использованием стали 18ХН2МФЛ и армировались твердым сплавом релит с грануляцией зерен 0,9 - 1,2 мм. Испытания проводились на стенде и по методике ОАО НПО «Буровая техника» - ВНИИБТ [155]. Схема стенда представлена на (рисунок 4.38). Суть методики заключается в следующем.

Изготавливают зубки диаметром 20 мм из материалов и с геометрией рабочей части, полностью соответствующей основным характеристикам испытываемого вооружения. Зубки 4 крепятся в специальной обойме-зажиме 3, расположенной внизу штока 9, который совершает вертикальные возвратно поступательные движения. Поднятие штока 9 вверх происходит за счет работы кулачка механизма 1, а перемещение вниз осуществляется под действием собственного веса. При этом общий вес штока может изменяться за счет дополнительных грузов 2. В процессе испытаний зубок 4 совершает постоянные вертикальные возвратно-поступательные движения. В нижней точке зубок соударяется с наклонным забоем 6, жестко зафиксированным в наковальне 7. Соударение зубка с наклонным забоем происходит в присутствии абразивной среды 4. Энергия удара зубка о наклонный забой регулируется либо количеством специальных пластин 8, либо массой навесных грузов. В процессе испытаний каждые две тысячи циклов нагружения осуществляется визуальный осмотр зуба на предмет сколов и сломом его основных рабочих поверхностей, замеры различных показателей износа, а также полная замена абразивного материала. Проведение испытаний велось с энергией удара от 18 до 20 Дж, что приблизительно моделирует условия работы зубчатого вооружения ШБИ при бурении средних пород. Основные характеристики стенда представлены в таблице 4.4. Критериями износа вооружения являются: уменьшение вылета и общей массы зуба, а также увеличение размеров его площадки притупления.

Стендовым испытаниям были подвергнуты несколько видов вооружения: поверхностно-армированное; центробежно-объемно-армированное с первым вариантом армированной зоны; центробежно-объемно-армированное со вторым вариантом армированной зоны, в симметричном и асимметричном исполнении рабочей части зубьев. Результаты испытаний отражены на (рисунок 4.39).

Анализ результатов проведенных сравнительных испытаний показал. Поверхностно-армированное симметричное вооружение изнашивается в основном за счет значительных сколов его армированных поверхностей, начиная с 2-4 тысяч циклов нагружения. В свою очередь это ведет к обнажению стальной матрицы данного типа вооружения на расстоянии примерно 1/3 высоты призматической рабочей головки зубьев вооружения, преимущественно со стороны сбегавшей грани. Износ по высоте асимметричных зубьев происходит с приблизительно такой же

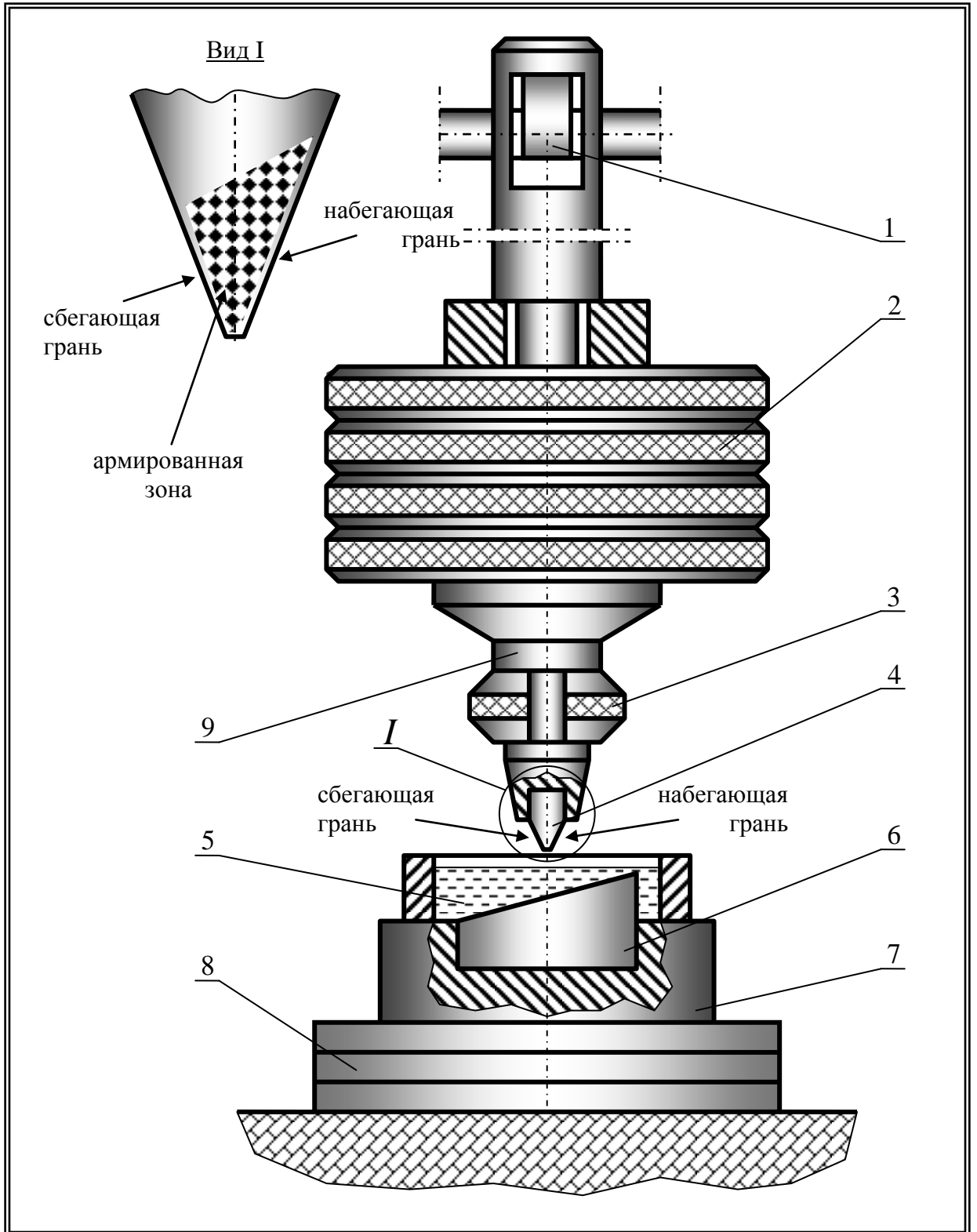


Рисунок 4.38 - Схема стенда для исследования ударно-абразивного изнашивания  
 1 - механизм кулачковый; 2 – грузы сменные; 3 - обойма зажимная; 4 – зуб вооружения;  
 5 – материал абразивный; 6. забой наклонный; 7 – наковальня сменная;  
 8 – пластины регулирующие; 9 – шток основной

скоростью по высоте, однако скалывание армированного слоя со стороны сбегающей грани существенно ниже. При дальнейшем испытании этого вида вооружения на представленной выше установке наблюдается плавное уменьшение вылета рабочей призматической части зубьев с одновременным увеличением размеров площадки притупления. Однако за счет того, что данная установка не может реализовать «эффект» скольжения зуба вооружения по поверхности забоя в момент соударения, износ ПАВ после частичного скалывания поверхностного-армированного слоя характеризуется главным образом деформированием стальной основы с одновременным незначительным ее истиранием.

Таблица 4.4 - Основные характеристики стенда

№	Наименование	Величина
1	частота ударов за минуту	120
2	угол встречи зуба с забоем, град.	16
3	масса основного штока, кг	25,7
4	материал абразивный	песок кварцевый
5	масса сменного груза, кг	8,2

Износ центробежно-объемно-армированного симметричного вооружения со вторым вариантом армированной зоны происходит главным образом посредством незначительного выкашивания твердосплавных частиц из поверхностного слоя вооружения. Основной причиной этого негативного процесса является то, что вследствие насыщения стальной основы Ц-О-АКМ зернами армирующего твердосплавного компонента происходит их частичное растворение и, как следствие, незначительное охрупчивание армированной зоны рабочей части призматического зуба. Его изнашивание сопровождается постепенным увеличением размеров площадки притупления и незначительным разрушением поверхностного слоя, преимущественно в верхней части призматического зуба со стороны его сбегающей грани (рисунок 4.39).

Износ центробежно-объемно-армированного симметричного вооружения с первым вариантом армированной зоны сопровождается незначительным выкрашиванием армированной зоны. Это подтверждает высказанное ранее предположение о том, что расположение износостойкого материала слоем только под поверхностью набегающей грани дает возможность повысить стойкость рабочей части призматических зубьев к восприятию циклических изгибающих нагрузок. Это достигается посредством того, что в этом случае значительно больший объем рабочей части призматического зуба выполнен из стали, не подвергшейся охрупчиванию вторичными карбидами, которые практически всегда образуются вследствие растворения поверхностных слоев зерен армирующего твердосплавного компонента в процессе изготовления ЦОАЗВ. При этом размещение армированной зоны под менее нагруженной рабочей поверхностью зуба позволяет снизить износ вооружения, связанный с выкрашиванием армирующего твердосплавно-

го компонента. Зубья с данной геометрической формой армированной зоны практически все прошли данные испытания с фактически одинаковым износом сбегавшей и набегающей граней (рисунок 4.39). Асимметричное вооружение обоих вариантов изнашивается меньше и более плавно, чем его симметричные аналоги.

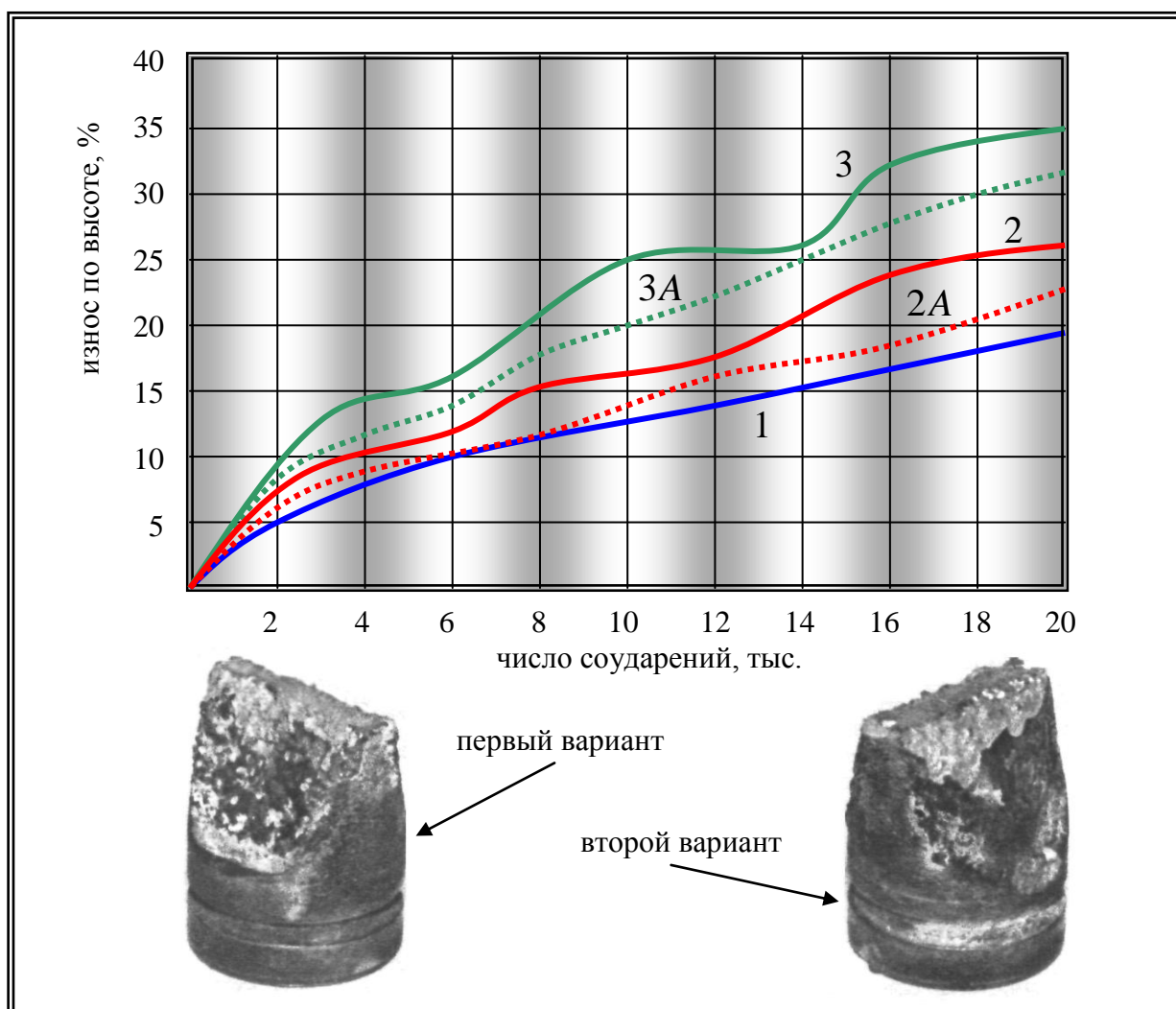


Рисунок 4.39 - Распределение напряжений по высоте армированной зоны зуба  
 1 – П АВ; 2 – ЦОАЗВ с первым вариантом армированной зоны; 2А - асимметричный зуб;  
 3 - ЦОАЗВ со вторым вариантом армированной зоны; 3А – асимметричный зуб

Таким образом, проведенные в данной главе теоретические исследования и полученные в ходе натурных экспериментов данные имеют хорошее согласование, тем самым доказывая возможность качественного проектирования геометрических параметров вооружения, включая форму армированной зоны, бурового инструмента, на основе использования анализа циклической прочности стального армированного вооружения. В дополнение к этому было доказано преимущество использования зубьев асимметричной формы на ведомых венцах вооружения ШБИ.



#### 4.12 Методика определения геометрических параметров вооружения бурового инструмента на основе процесса математического моделирования

Разработка и конструирование зубчатого вооружения ШБИ обычно основывается на предположении о том, что зубья шарошек инструмента внедряются в горную породу на некоторую глубину, величина которой главным образом зависит от крепости разрушаемых пород. Тем не менее, данное предположение справедливо только в отношении разбуривания мягких и средних пород, обладающих небольшой твердостью. При бурении твердых и особенно крепких пород, даже при приложении максимально возможных нагрузок на инструмент, зубья шарошек практически не внедряются в поверхностный слой забоя. При этом разрушение горной породы имеет объемно-усталостный характер и только лишь в несущественной степени осуществляется разрушение поверхностных слоев. Доказательством этого служит тот факт, что в процессе бурения крепких пород эвакуируемая на поверхность разрушенная порода содержит в себе значительную долю крупных частиц, образование которых никак не может быть связано с процессом поверхностного разрушения горных пород.

Также известно, что при разрушении твердых и крепких пород фактор времени контактирования зубьев шарошки с забоем становится менее значительным, особенно для хрупких пород, в сравнении с разбуриванием пород, обладающих достаточно высокой пластичностью. Повышение эффективности разрушения пород данного типа обычно достигается за счет увеличения частоты ударов в одно и то же место забоя. В свою очередь, по мере увеличения контактного давления количество ударов, необходимое для объемно-усталостного разрушения, уменьшается и, в конце концов, при некотором значении силы удара происходит разрушение по всему объему напряженной зоны от первого же воздействия зуба на породу [44].

Многочисленными теоретическими и лабораторными исследованиями было установлено, что процесс разрушения горных пород при использовании ШБИ имеет скачкообразный характер. Как правило, разрушение происходит по следующему сценарию. За некоторое время в горной породе создается определенное напряженное состояние, и впоследствии, когда напряжения достигают предела прочности породы, наступает ее разрушение. Эйгелес Р.М. математическим путем вывел формулу, позволяющую с достаточной точностью определять минимальное время контакта зуба ШБИ с породой, необходимое для создания требуемого напряженного состояния для начала процесса хрупкого разрушения породы забоя [169]

$$\tau = \frac{P_1 \left( 1 + \frac{kf}{c} \right)}{v_0 kf}, \quad (4.107)$$

где

$k$  - коэффициент упругости породы;  $P_1$  - сила разрушения для первого скачка;

$f$  - площадь контактной поверхности;  $v_0$  - скорость соударения зуба вооружения ШБИ с поверхностью забоя;  $c$  - сила, требуемая для сжатия упругого элемента на единицу его длины.

В дополнение к этому нужно обеспечить, чтобы время взаимодействия зубчатого вооружения ШБИ на забой удовлетворяло условию

$$\tau \leq t_z. \quad (4.108)$$

При соблюдении этого условия механическая скорость бурения шарошечного инструмента будет приближаться к своим максимальным значениям, вместе с тем удельные расход энергии и износ ШБИ - стремиться к минимуму. Определить время воздействия зуба вооружения на породу поверхности забоя можно следующим образом [169]:

$$t_z = \frac{60 \frac{d}{D}}{n_D z}, \quad (4.109)$$

где

$z$  - количество зубьев вооружения;  $n_D$  - частота вращения долота;  $D$  - диаметр долота;

$d$  - диаметр шарошки.

$$z = \frac{v_0 k f}{P_1 \left(1 + \frac{k f}{c}\right) n_{III}}, \quad (4.110)$$

где  $n_{III}$  - частота вращения шарошки.

В случае наличия ограничений по увеличению нагрузки на ШБИ повысить контактное давление на поверхность забоя возможно за счет уменьшения количества зубьев вооружения  $z$ , это во многих ситуациях дает возможность перейти в более эффективный режим объемного разрушения породы.

Уменьшение количества зубьев вооружения  $z$  ведет к увеличению времени взаимодействия каждого зуба ШБИ с забоем скважины и одновременно с этим приводит к уменьшению минимально необходимого времени  $\tau$  за счет повышения скорости соударения зуба с породой  $v_0$ . При уменьшении числа зубьев вооружения ШБИ  $z$  процесс разрушения породы забоя обретает ярко выраженный ударный характер. Одновременно с этим происходит увеличение зазора между поверхностью забоя и телами шарошек, что обеспечивает значительное улучшение условий для эвакуации шлама из-под зубьев вооружения шарошек ШБИ.

Многочисленные данные, которые были получены из практики бурения, в большинстве своем подтверждают вышесказанные утверждения. Например, установлено, что бурение песчаников средней твердости долотами, предназначенными для разбуривания мягких пород, позво-

ляет достичь большей механической скорости и проходки на инструмент в сравнении с долотами, предназначенными для разбуривания средних пород, при одинаковых режимах бурения.

Таким образом, важным компонентом при решении задачи повышения эффективности ШБИ является исследование изменения его рабочей способности вследствие воздействия разных факторов. На основе анализа таких данных возможно установить наиболее существенные факторы, оказывающие влияние на эффективность работы зубчатого вооружения ШБИ, с учетом влияния их межфакторного взаимодействия. Обладание данными подобного рода позволит не только улучшить понимание природы взаимодействия зубчатого вооружения ШБИ с разрушаемой породой забоя, а также его износа, но и проводить математические моделирования данных процессов. Однако подобные исследования должны отвечать разным требованиям, чтобы в конечном итоге оказать положительное влияние на качество конечной модели объекта. На сегодняшний день при решении таких задач получило широкое распространение использование различных методов организации и планирования экспериментов. Применение этого математического аппарата дает возможность с успехом решать различные практические задачи.

Главной задачей является идентификация основных факторов, оказывающих наибольшее влияние на эффективность работы ШБИ. За основное ограничение обычно принимается износ по высоте, он не должен превышать  $1/3$  вылета зуба вооружения за определенное время работы инструмента. Это обусловлено с тем, что высота зубьев вооружения над телом шарошки в основном определяет работоспособность и рабочий ресурс зубчатого вооружения ШБИ. При уменьшении вылета зубьев шарошек инструмента происходят значительное снижение единичных ударных нагрузок зубьев вооружения о забой, уменьшение контактного удельного давления на породу забоя и, естественно, снижение основных показателей бурения.

Планирование эксперимента - это проведение мероприятий по составлению факторного плана, который бы учитывал все основные факторы, их взаимовлияние, а также порядок и количество испытаний [9, 105, 154].

Основным результатом проделанного эксперимента обычно становится исследование в разных формах отклика системы с соответствующими выводами об объекте исследований с определенной точностью. Нужно создать адекватную модель на выбранной подобласти факторного пространства, величина отклика которой не должна отличаться от фактических значений больше, чем на некоторое заданное значение. Таким образом, в нашем случае нужно решить задачу, связанную с построением регрессионной модели.

Модель объекта, как правило, представляет собой черный ящик (рисунок 4.40), в котором  $x_1 \dots x_k$  – факторы, воздействующие на объект;  $f$  – функция отклика системы;  $y$  – отклик системы.

По результатам каждого однофакторного эксперимента, проведенного на установке и по методике ОАО НПО «Буровая техника» - ВНИИБТ, было установлено, что при определенных условиях бурения на работоспособность зубчатого вооружения в основном влияют три фактора: Ф1 – величина угла заострения зуба вооружения; Ф2 – вертикальная нагрузка на зуб; Ф3 – угол соударения зуба вооружения с забоем [157].

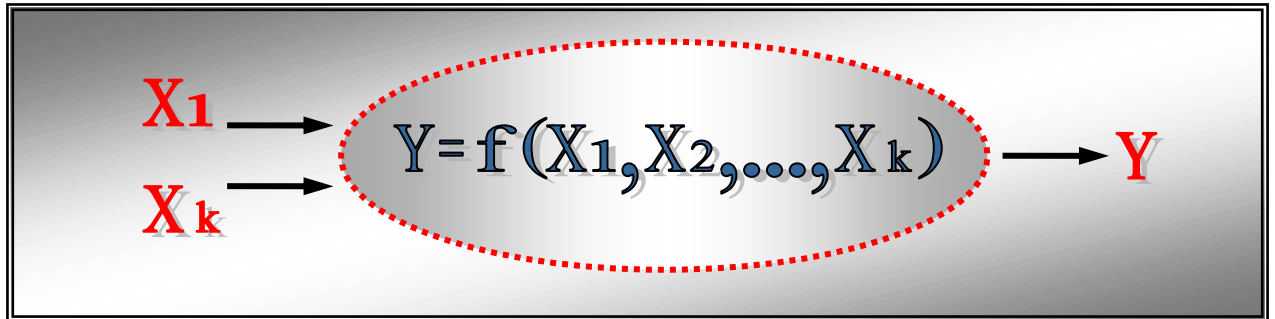


Рисунок 4.40 – Принципиальная схема модели объекта

Таким образом, зная число факторов, можно вычислить максимальное количество экспериментов

$$N = m^k, \quad (4.111)$$

где

$N$  – число экспериментов;  $m$  – число уровней факторов;  $k$  – число факторов.

В данном случае число опытов в полном факторном эксперименте равно - 8:

$$N = 2^3. \quad (4.112)$$

При составлении матрицы по планированию эксперимента  $2^3$  (таблица 4.5) введем определенные обозначения: при нахождении фактора на верхнем уровне (значение максимальное) - ставится буква, при нахождении фактора на нижнем уровне - устанавливается условие (4.111). Кодировка значений таблицы (+1; -1) осуществляется при помощи линейных преобразований координат факторного пространства, с центром начала координат в нулевой точке

$$x_i = \frac{c_i - c_{0i}}{\mu}, \quad (4.113)$$

где

$c_i$  – величина фактора;  $x_i$  – величина фактора - кодированное;

$\mu$  - величина интервала варьирования;  $c_{0i}$  – величина фактора на нулевом уровне.

Необходимо, чтобы составленная матрица планирования соответствовала таким требованиям ортогональности, симметричности, условиям нормировки.

При предположении о линейности процесса, математическая модель проводимого эксперимента, без учитывания коэффициентов тройного взаимодействия, преобразуется в линейный

Таблица 4.5 - Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Факторы						Код	Параметр оптимизации
	Ф1	Ф2	Ф3	Ф1Ф2	Ф1Ф3	Ф2Ф3		y
1	-	-	-	+	+	+	(1)	y1
2	+	-	-	-	-	+	a	y2
3	-	+	-	-	+	-	b	y3
4	+	+	-	+	-	-	c	y4
5	-	-	+	+	-	-	abc	y5
6	+	-	+	-	+	-	ac	y6
7	-	+	+	-	-	+	ab	y7
8	+	+	+	+	+	+	bc	y8

полином 1-й степени:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3, \quad (4.114)$$

где

$b$  – требующие нахождения коэффициенты.

Для того чтобы вычислить линейные коэффициенты используется соотношение [156]

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{N}; \quad (4.115)$$

при этом  $j = 1, 2, \dots, k$ . Вычисление коэффициентов парного взаимодействия аналогично:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u}{N}; \quad (4.116)$$

при этом  $u = 1, \dots, N; i, j = 1, \dots, k$ .

Далее, чтобы вычислить свободный член  $b_0$  нужно определить среднее арифметическое значение параметра оптимизации

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}; \quad (4.117)$$

при этом  $j = 1, 2, \dots, N$ .

Чтобы оценить надежность осуществленных измерений с доверительной вероятностью в девяносто пять процентов, осуществим расчет доверительного интервала для среднего значения результата проведенных измерений:

$$x = \bar{x} \mp 1,96 \frac{S}{\sqrt{n}}; \quad (4.118)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (4.119)$$

где

$n$  – количество измерений;  $\bar{x}$  – среднее арифметическое случайной величины;  
 $S$  – отклонение стандартное.

Чтобы оценить отклонение  $\bar{x}$  от истинного  $x$  при незначительном числе измерений, нужно использовать критерий Стьюдента

$$P\left(\bar{x} - \frac{ts}{\sqrt{n}} \leq x \leq \bar{x} + \frac{ts}{\sqrt{n}}\right) = 0,95, \quad (4.120)$$

где

$t$  - критерий Стьюдента, имеющий  $(n-1)$  степени свободы.

Чтобы проверить однородность дисперсий, возможно применить критерий Фишера  $F$

$$F = \frac{S_{\max}^2}{S_{\min}^2}; G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_1^N S_i^2}, \quad (4.121)$$

где

$S^2$  – среднеквадратичное отклонение.

Если выполняется условие  $F_{\text{расчетное}} < F_{\text{табличное}}$ ,  $G_{\text{расчетное}} < G_{\text{табличное}}$ , то дисперсии являются однородными. С целью проверки справедливости математической модели был использован критерий Фишера, и в результате проведенной проверки была подтверждена ее адекватность (коэффициенты указаны в (таблице 4.7).

Как было отмечено ранее, для того чтобы экспериментально определить влияние нескольких факторов, таких как угол заострения зуба, вертикальная нагрузка на зуб и угол взаимодействия зуба с поверхностью забоя, на способность зубчатого вооружения ШБИ сохранять свою работоспособность в условиях действия знакопеременных динамических нагрузок, были проведены стендовые испытания на стойкость к ударно-абразивному износу поверхностно-армированного зубчатого вооружения ШБИ.

Испытания проводились на стенде и по методике ОАО НПО «Буровая техника» - ВНИИБТ [93]. Суть методики заключается в следующем. Изготавливают зубки диаметром 20 мм из материалов и с геометрией рабочей части, полностью соответствующей основным характеристикам испытываемого вооружения. Зубки крепятся в специальной обойме-зажиме, расположенной внизу штока, который совершает вертикальные возвратно-поступательные движения. Поднятие штока вверх происходит за счет работы кулачка механизма, а перемещение вниз осуществляется под действием собственного веса. При этом общий вес штока может изменяться за счет дополнительных грузов. В процессе испытаний зубок совершает постоянные вертикальные возвратно-поступательные движения. В нижней точке зубок соударяется с наклонным забоем 6, жестко зафиксированным в наковальне. Соударение зубка с наклонным забоем происходит в присутствии абразивной среды. Энергия удара зубка о наклонный забой регулируется

либо количеством специальных пластин, либо массой навесных грузов. В процессе испытаний каждые две тысячи циклов нагружения осуществлялись следующие мероприятия: поворот наклонного забоя на 180 градусов; визуальный осмотр зуба на предмет сколов и сломом его основных рабочих поверхностей; замеры различных показателей износа, а также полная замена абразивного материала. Проведение испытаний осуществлялось при различных величинах энергии удара, углов наклона забоя и заострения зубьев, по своим параметрам, соответствующим условиям работы ШБИ при разбурировании горных пород разной твердости. Наиболее важные параметры проведенных испытаний представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Основные параметры испытаний

№	Наименование	Величина		
1	угол заострения зубьев вооружения, град	40	45	50
2	масса штока установки, кг	20,6	24,7	28,8
3	угол наклона забоя, град.	10	15	20
4	масса одного навесного груза, кг	4,1		
5	абразивный материал	кварцевый песок		

Результаты практических испытаний  $y$  и математического моделирования  $y^*$  представлены на (рисунок 4.41), (рисунок 4.42), и (таблице 4.6).

В (таблице 4.7) представлены рассчитанные коэффициенты регрессии  $b_j$  модели (4.114). Зависимость между наблюдаемыми и предсказанными значениями показана на (рисунок 4.42). Предсказанные средние значения для  $y^*$  представлены на (рисунок 4.43).

Таблица 4.6 - Результаты математического моделирования  $y^*$ 

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$y$	4,2	3,2	6,2	5,2	4,5	3,6	6,6	5,5
$y^*$	4,175	3,225	6,225	5,175	4,525	3,575	6,575	5,525

Таблица 4.7 - Рассчитанные коэффициенты регрессии  $b_j$  модели

$j$	0	1	2	3	4	5	6
$b_j$	4,875	-0,5	1	0,175	-0,025	0	0

Проведенная работа свидетельствует о том, что теоретические исследования полностью подтверждаются данными, полученными в ходе лабораторных экспериментов. Результатом работы явились создание адекватной математической модели износа зубьев вооружения ШБИ, а также установление степени влияния одиночных факторов и их межфакторного взаимодействия.

Анализ математической модели с точки зрения ее основных факторов показал, что наибольшее влияние на скорость изнашивания зубчатого вооружения ШБИ оказывает

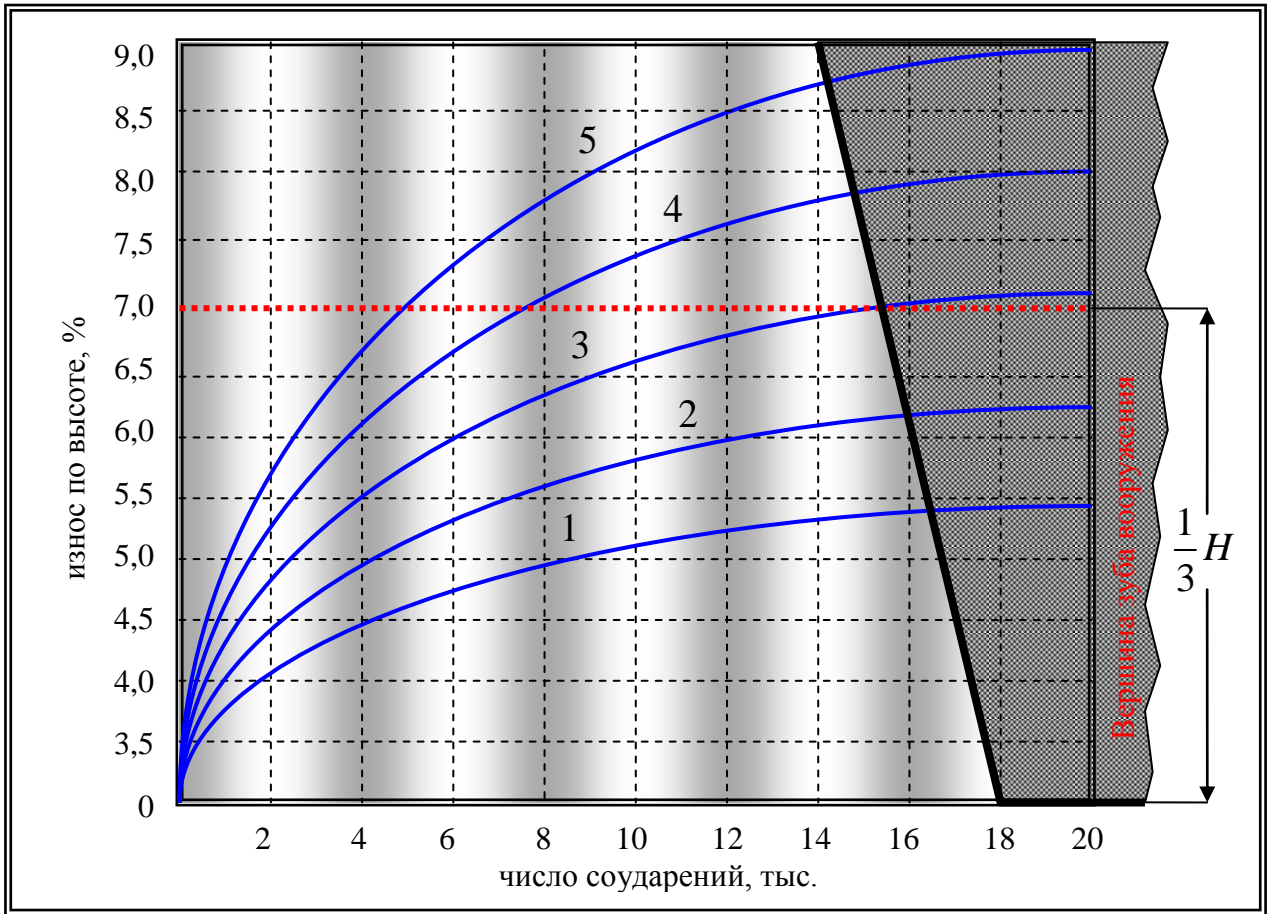


Рисунок 4.41 - Зависимость износа зубьев по высоте от нагрузки

1 - при весе грузов 26,0 кг; 2 - при весе грузов 28,0 кг; 3 - при весе грузов 30,0 кг;  
 4 - при весе грузов 32,0 кг; 5 - при весе грузов 34,0 кг



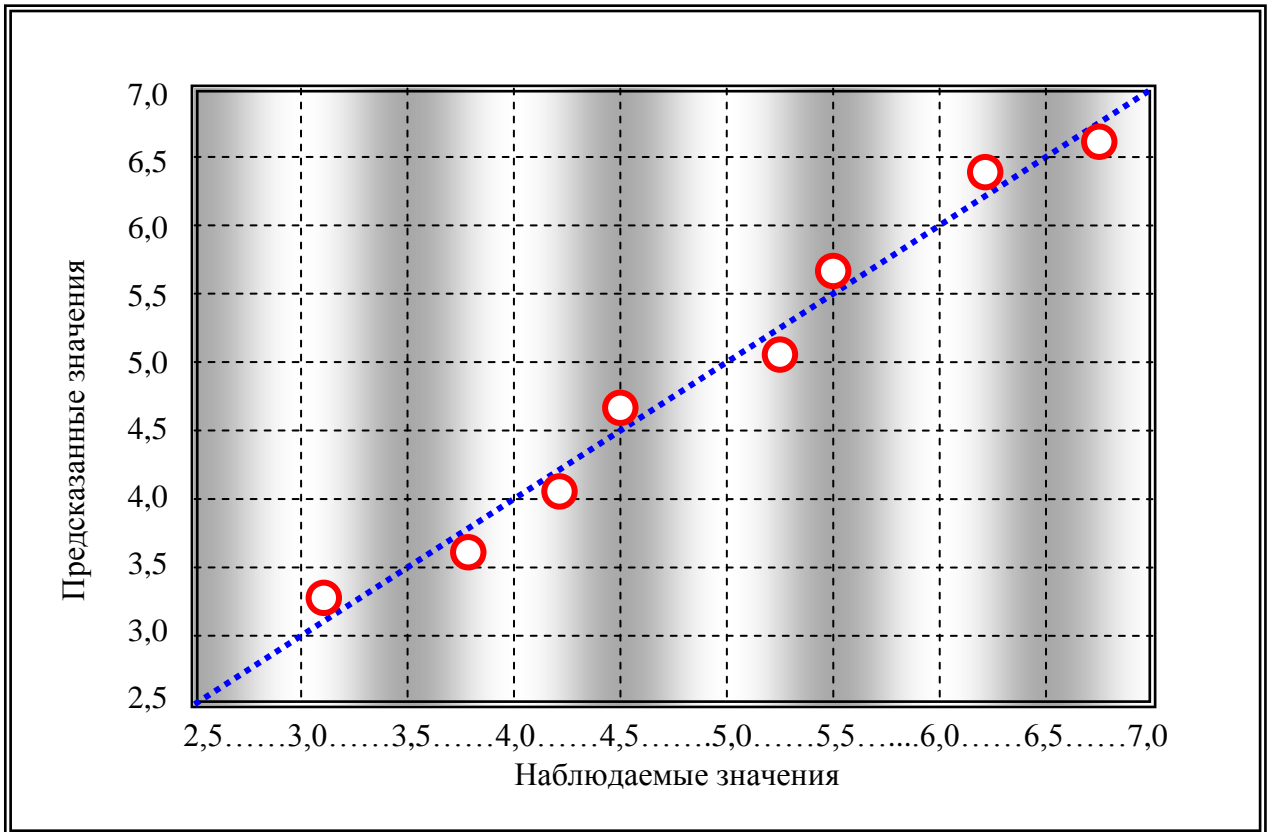


Рис 4.42 - Зависимость между наблюдаемыми и предсказанными значениями

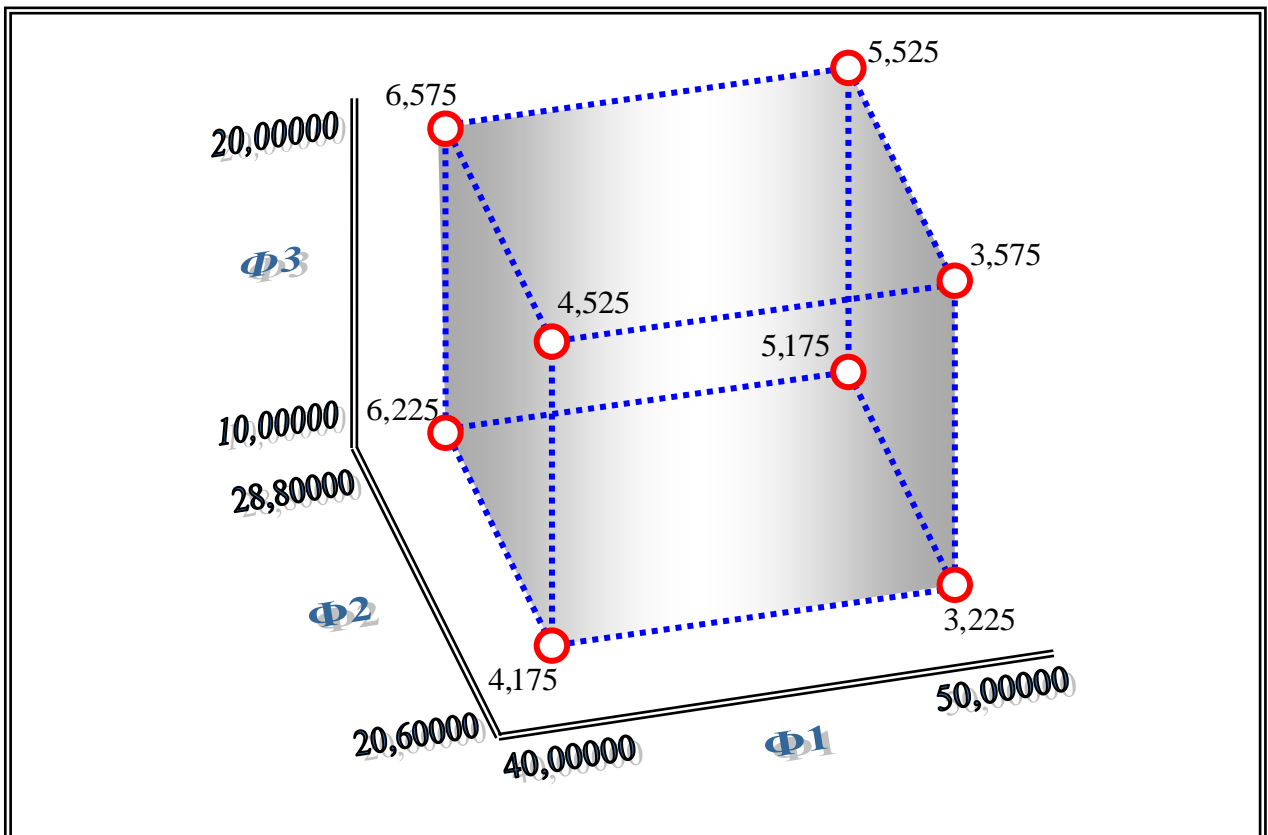


Рисунок 4.43 - Предсказанные средние значения для  $y^*$

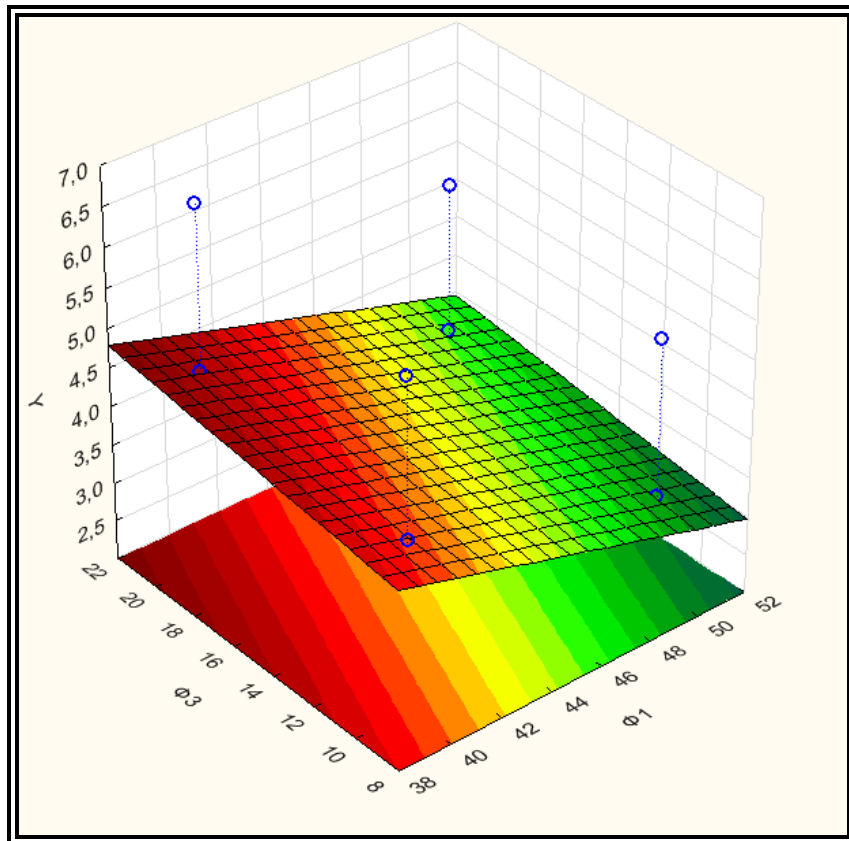


Рисунок 4.44 - Карта зависимости  $Y^*$  от различных факторов  $\Phi_1$ ,  $\Phi_3$  и фиксированном  $\Phi_2$

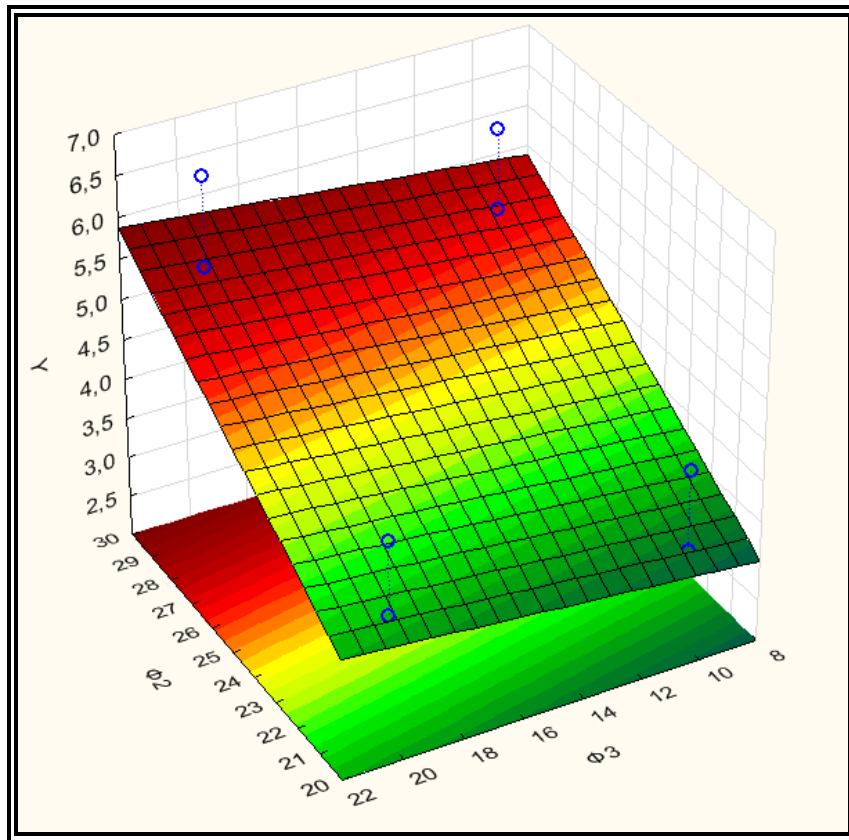


Рисунок 4.45 - Карта зависимости  $Y^*$  от различных факторов  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  и фиксированном  $\Phi_1$

вертикальная нагрузка на зубья вооружения. В свою очередь угол заострения рабочей головки зуба и угол соударения (встречи) зуба вооружения с забоем являются факторами, имеющими гораздо меньшее значение. Однако все полученные в ходе проведенных исследований коэффициенты отражают только влияние факторов внутри незначительной области общего факторного пространства.

Проведенное в рамках общих исследований математическое моделирование процессов износа зубьев вооружения ШБИ под действием разного рода факторов позволило разработать новую методику, позволяющую уже на ранних стадиях проектирования и разработки ШБИ рассчитывать значения основных геометрических параметров зубчатого вооружения шарошек.

Суть методики сводится к следующему. Фиксируется один из трех (или более) основных параметров и далее на основе, рассчитанной по результатам математического моделирования, зависимости  $y^*$  от других основных факторов  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  (рисунки 4.44 и 4.45), решается либо прямая задача, заключающаяся в определении износа в границах подобласти факторного пространства, или обратная, заключающаяся в определении величин факторов в зависимости от степени износа зубчатого вооружения [105, 169]. К примеру, при фиксировании величины вертикальной нагрузки на зубчатое вооружение определяются предпочтительные значения угла заострения и шага зубьев, позволяющих обеспечить повышенную эффективность работы ШБИ в данных условиях бурения (рисунок 4.44). При фиксировании одной из величин, определяющих геометрические характеристики вооружения, то есть шаг или угол заострения зубьев, определяется предпочтительное значение вертикальной нагрузки на зубья вооружения ШБИ (рисунок 4.45). Для более общего случая, нужно осуществить дополнительные исследования, чтобы описать практически стационарную область, то есть определить ее форму и границы, что даст возможность при решении конкретной поставленной задачи использовать более гибкие критерии.

Разработанная методика дает возможность значительно упростить процесс разработки и проектирования геометрических параметров зубчатого вооружения ШБИ. Если зафиксировать значение одного из главных параметров процесса бурения (осевая нагрузка на инструмент), можно с достаточной степенью точности определить наиболее рациональные величины угла заострения и шага зубьев, позволяющих обеспечить повышенную эффективность работы зубчатого вооружения ШБИ при бурении всех основных типов горных пород.

Таким образом применение на практике новой методики даст возможность повысить качество проектирования зубчатого вооружения шарошек и существенно снизить время и финансовые затраты при разработке новых конструкций ШБИ.

**Выводы по главе 4**

1 Разработана методика расчета максимальных изгибающих нагрузок, действующих на зубья ШБИ, работающего в отсутствие проскальзывания его вооружения.

2 Проведен сравнительный анализ статической прочности прямозубого и косозубого поверхностно-армированного вооружения, позволивший установить, что при одинаковых нагрузках, напряжения, возникающие в косозубом вооружении (с углом наклона зубьев к образующей шарошки  $25^0$ ) в самом опасном сечении, ниже в 2 раза, чем в аналогичном сечении прямозубого вооружения. В связи с этим оснащение шарошек косозубым вооружением дает возможность создавать буровой инструмент с меньшими углами заострения зубьев, при одновременном сохранении их прочности, что позволяет улучшить внедряемость вооружения в поверхность забоя и способствует увеличению основных показателей бурения, таких как: механическая скорость бурения и проходки на инструмент.

3 Исследование напряженно-деформируемого состояния ЦОА КЗВ ведущих венцов ШБИ позволило установить, что работа ведущих венцов центробежно-объемно-армированного КЗВ при бурении средних пород характеризуется неравномерностью распределения нагрузки между смежными зубьями КЗВ, одновременно разрушающими забой. При этом НДС зубьев ЦОАЗВ характеризуется следующей зависимостью: наибольшие напряжения возникают в вершинной части зуба с противоположной стороны углу его наклона по отношению к поверхности забоя и постепенно и плавно уменьшаются в направлении основания зуба.

4 Разработана методика расчета максимальных изгибающих нагрузок, действующих на зубчатое вооружение ведомых венцов ШБИ, позволившая установить, что применение асимметричного зубчатого вооружения для оснащения ведомых венцов шарошек, с одновременным упрочнением зубьев ШБИ Ц-О-АКМ слоем под набегающей гранью, дает возможность существенно уменьшить как средние, так и максимальные напряжения, которые возникают в зубьях вооружения в процессе работы ШБИ. В свою очередь, меньшая нагруженность армированной зоны, которая в значительной степени и определяет долговечность зубчатого вооружения, даст возможность повысить и эффективность работы ШБИ в целом.

5 Сравнительный анализ НДС симметричных и асимметричных зубьев центробежно-объемно-армированного КЗВ ведомых венцов ШБИ позволил установить, что работа косозубого симметричного и асимметричного ЦОАЗВ характеризуется неравномерностью распределения нагрузки между смежными зубьями КЗВ, одновременно разрушающими забой. При этом неравномерность нагружения, возникающая в асимметричном вооружении, незначительно выше, а величины напряжений существенно ниже, чем у вооружения оснащенного симметричными зубьями. Напряженно-деформируемое состояние для обоих типов зубьев ЦОАЗВ характери-

зудается следующей зависимостью: наибольшие напряжения возникают в вершинной части зуба с противоположной стороны углу его наклона по отношению к поверхности забоя и постепенно и плавно уменьшаются в направлении основания зуба.

6 Проведенные математическое моделирование и экспериментальные исследования позволили установить взаимовлияние скорости вращения литейной формы и углов косоизубности и асимметрии зубьев вооружения ШБИ в процессе ЦОА на распределение частиц армирующего твердосплавного компонента по ширине центробежно-объемно-армированного косоизубного вооружения.

7 Проведенный расчет геометрических параметров зоны армирования, обеспечивающей повышенную стойкость зубьев вооружения шарошек к ударным нагрузкам, позволил определить: толщину демпферного слоя основного металла над армированной зоной со стороны набегающей грани 0,4-1,0 мм и соотношение объемов армированного слоя и рабочей части зуба центробежно-объемно-армированного вооружения  $V_2 = (0,25 \div 0,35) V_1$ .

8 Разработанная новая методика определения модуля упругости армирующего композиционного материала, используемого для упрочнения вооружения шарошечного бурового инструмента, позволила определить значения модулей упругости центробежно-объемно-армированного композиционного материала: с сорока процентной концентрацией твердого сплава  $E_{40\%} = 2,643 \cdot 10^5$  МПа; с шестидесяти процентной концентрацией твердого сплава  $E_{60\%} = 2,813 \cdot 10^5$  МПа.

9 Разработанная новая методика определения допускаемого напряжения при изгибе армирующего композиционного материала, используемого для упрочнения вооружения шарошечного бурового инструмента, позволила определить значения допускаемых напряжений при изгибе центробежно-объемно-армированного композиционного материала: с сорока процентной концентрацией твердого сплава  $[\sigma] = 1,401$  МПа; с шестидесяти процентной  $[\sigma] = 1,394$  МПа.

10 Разработана экспресс-методика расчета на прочность стального армированного зубчатого вооружения по допускаемым напряжениям изгиба, основанная на методе приведенного поперечного сечения, позволяющая не только оперативно рассчитывать геометрию зубьев вооружения, но и корректировать технологические параметры режима бурения, исходя из прочностных характеристик вооружения ШБИ.

11 Определение циклической прочности ЦОАЗВ шарошечного бурового инструмента, проведенное на основе теоретических и экспериментальных исследований, показало хорошую сходимость полученных результатов, тем самым доказав возможность проектирования геометрических параметров вооружения, включая форму армированной зоны, путем теоретических расчетов циклической прочности вооружения ШБИ.

12 С использованием математического моделирования была разработана методика определения геометрических характеристик зубчатого вооружения ШБИ, дающая возможность значительно упростить процесс разработки и проектирования геометрических параметров зубчатого вооружения ШБИ. Если зафиксировать значение одного из главных параметров процесса бурения (осевая нагрузка на инструмент), можно с достаточной степенью точности определить наиболее рациональные величины угла заострения и шага зубьев, позволяющих обеспечить повышенную эффективность работы зубчатого вооружения ШБИ при бурении всех основных типов горных пород.

**ГЛАВА 5.****ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОМЫВКИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ  
ПРОМЫВОЧНЫХ СИСТЕМ ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА  
С КОСОЗУБЫМ ВООРУЖЕНИЕМ**

Из практики бурения нефтегазовых скважин и стволов большого диаметра известно, что затраты, требующиеся для осуществления качественной промывки, могут составлять 10 – 30 % по отношению к общей цене сооружения скважины. В дополнение к этому задействуется практически более половины мощностей приводов буровых установок. Поэтому одной из главных задач совершенствования техники и технологий проведения буровых работ является необходимость существенно повысить эффективность функционирования отдельных узлов и систем промывки в целом ШБИ.

**5.1 Совершенствование способов крепления гидромониторных насадок  
в промывочных узлах шарошечного бурового инструмента**

Эффективность работы шарошечного бурового инструмента во многом определяется совершенством системы очистки скважины. Современные технологии бурения, как правило, основаны на непрерывной схеме циркуляции бурового раствора. Знание и понимание процессов, происходящих при течении жидкости во время промывки, позволяют определять гидродинамические закономерности, выявлять «слабые места» существующих систем и намечать пути дальнейшего совершенствования гидравлического оборудования.

Очистка забоя и вооружения инструмента от выбуренного шлама в современном ШБИ производится за счет потоков, различных очистных агентов, которые подводятся к забою посредством промывочных узлов, различных конструкций, оснащенных гидромониторными насадками и размещенных в корпусе ШБИ. При этом от геометрических характеристик промывочных узлов во многом зависят не только эффективность процесса промывки, но и бурения в целом. Рациональная организация потоков промывочной жидкости в призабойной зоне и предотвращение сальникообразования, особенно на зубьях вооружения шарошек, также является значительным фактором, влияющим на повышение производительности буровых шарошечных долот, особенно при проходке глинистых пород.

Главными рабочими элементами промывочных узлов различного шарошечного бурового инструмента являются гидромониторные насадки. Именно от их конструктивных особенностей (профилей, размеров и т. д.) в основном зависит эффективность функционирования промывочных узлов в целом.

Успешная работа шарошечного бурового инструмента, оснащенного промывочными узлами, напрямую определяется скоростью истечения из гидромониторных насадок потока промывочного агента. Соответственно, чем больше скорость струи при соударении с поверхностью забоя, тем выше эффективность бурового инструмента. При этом система промывки ШБИ с гидромониторными узлами должна надежно воспринимать существенные перепады давлений при одновременном обеспечении требуемых для конкретных условий бурения скоростных показателей истечения струи. В связи с этим выясним, отвечают ли современные конструкции шарошечного бурового инструмента, оснащенного гидромониторными узлами, перечисленным выше требованиям. При производстве ШБИ наибольшее распространение у нас в стране и за рубежом получили конструкции промывочных узлов со следующими крепежными элементами [58, 108, 148, 170]:

- различных разрезных пружинных колец; - стержневых соединений; - резьбовых втулок.

Для оснащения промывочных узлов ШБИ небольших диаметральных размеров, как правило, используются гидромониторные насадки, фиксируемые в теле инструмента при помощи разрезных колец. Конструкции промывочных узлов подобного рода состоят из металлокерамической гидромониторной насадки, внешняя цилиндрическая поверхность которой расположена в ответном отверстии корпуса инструмента. Герметизация зазора между этими поверхностями осуществляется при помощи специального уплотнительного кольца. Фиксация насадки происходит за счет стопорного разрезного кольца, устанавливаемого в кольцевой проточке внутренней стенки промывочного узла. Основная функция стопорного кольца – предотвращение выпадения уплотнения и насадки в процессе работы инструмента.

Простота и незначительная стоимость данных конструкций определили их широкое распространение при производстве различного бурового инструмента. Однако эти конструкции обладают и рядом существенных недостатков, одним из которых является их низкая надежность. Связано это, прежде всего с тем, что установка стопорного кольца подразумевает наличие зазора между верхним торцом насадки и дном отверстия промывочного узла. Наличие указанного зазора, с одной стороны, снижает надежность герметизации, с другой - приводит к неравномерной, точечной нагрузке на стопорное кольцо, что неминуемо приводит к его выдавливанию из фиксирующей проточки. Другой причиной потери работоспособности данных промывочных узлов является размыв стопорных колец отраженными потоками промывочной жидкости. Наиболее часто это происходит при присутствии в буровом растворе абразивного материала. Практика использования породоразрушающего бурового инструмента, оснащенного промывочными узлами данной конструкции, показывает, что зачастую, по различным причинам, происходит выпадение насадок на поверхность забоя скважины,



1.



2.

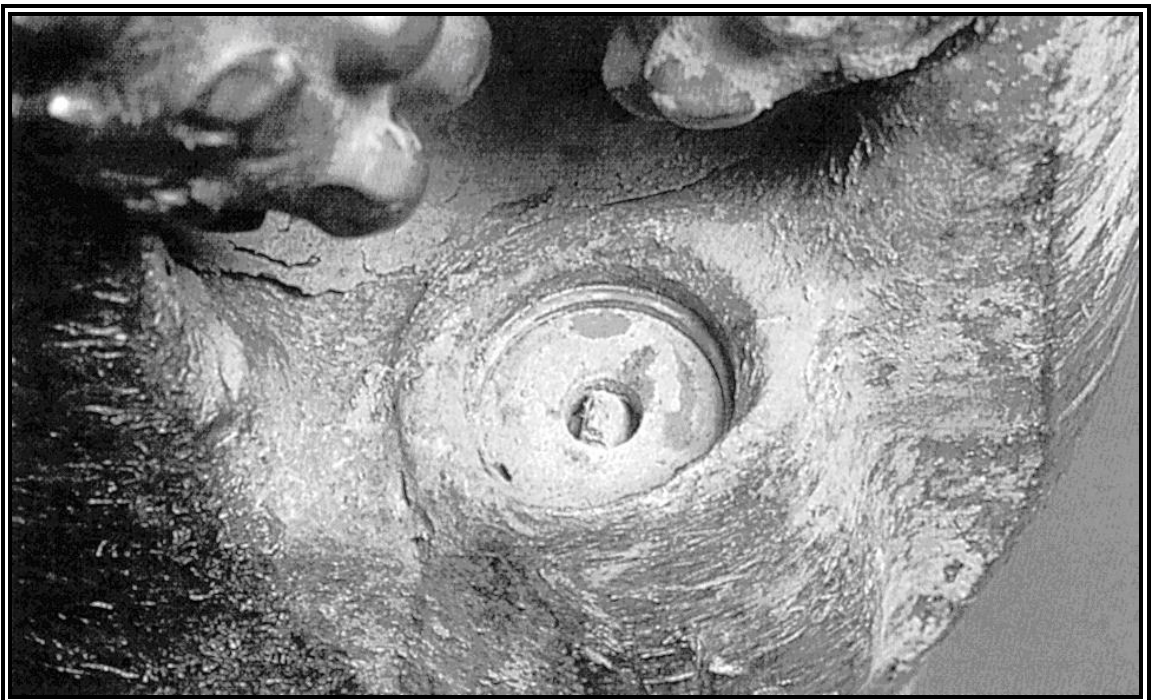


Рисунок 5.1 - Варианты потери работоспособности промывочного гидромониторного узла

1 - утеря насадки; 2 - забивка насадки

что неминуемо приводит к снижению механической скорости бурения и проходки на долото (рисунок 5.1.1). Перемалывание выпавшей твердосплавной гидромониторной насадки зубчатым вооружением шарошек неминуемо приводит к поломкам или интенсивному износу зубьев. Менее распространенным, однако характерным для большинства конструкций промывочных узлов является потеря их работоспособности вследствие закупорки (рисунок 5.1.2).

Некоторые зарубежные производители бурового инструмента с целью защиты пружинного кольца используют специальный эластичный элемент из износостойкого материала, который различными способами крепится к стопорному кольцу и обеспечивает предохранение его нижнего торца и внутренней поверхности [173].

Как правило, промывочные узлы, оснащенные гидромониторными насадками, закрепленными при помощи стопорных пружинных колец, размещенных под ними, достаточно надежны при скоростях потока промывочной жидкости до 65 м/с.

Однако с увеличением скорости потока до 100-120 м/с, то есть при максимальной реализации гидромониторного эффекта, резко увеличивается число отказов, связанных с разрушением или размывом пружинных колец [54, 149, 170]. Поэтому были спроектированы несколько вариантов конструкций узлов промывки, позволяющих существенно увеличить их надежность и эффективность, а также упростить их монтаж и демонтаж.

Достижение технического результата согласно 1-му варианту, осуществляется за счет того, что узел промывки ШБИ оснащен фиксирующим элементом, представляющим собой ступенчатый стержень. Насадка при этом изготовлена с продольными ступенчатыми пазами на боковой поверхности для размещения фиксаторов, высота большей ступени которых меньше высоты ступени паза насадки большего размера, причем в рабочем положении ступени стержней меньшего размера установлены с возможностью взаимодействия с внутренней поверхностью стопорного разрезного кольца [65]. На (рисунок 5.2.1) изображен общий вид промывочного узла в продольном разрезе в рабочем положении, а на (рисунок 5.2.2) представлено сечение А–А. Гидромониторный узел промывки состоит из корпуса 1, имеющего канал 2 и гнездо 3 для размещения насадки 4. В гнезде 3, выполнена кольцевая расточка 5, для стопорного кольца 6. Насадка 4 выполнена с продольными пазами 7, боковые поверхности которых имеют ступенчатую форму, требующуюся для размещения фиксирующих устройств 8 с ответной ступенчатой формой. Причем высота ступени фиксирующего устройства 8 с наибольшим размером меньше высоты наибольшего размера ступени паза 7 гидромониторной насадки 4 на величину, обеспечивающую беспрепятственную установку разрезного стопорного кольца 6 в расточке кольцевой 5 гнезда 3. Достигается это только

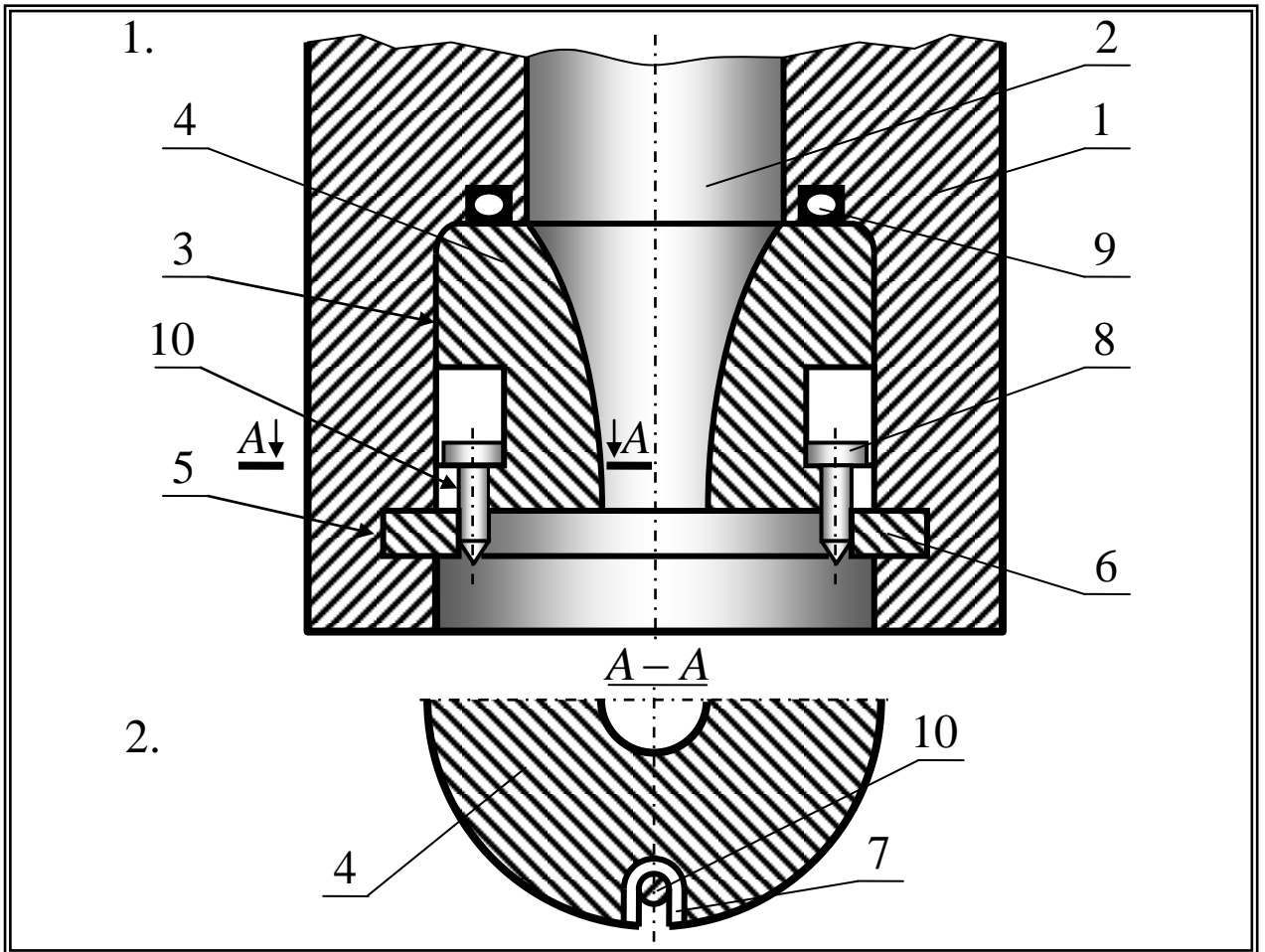


Рисунок 5.2 - Схема промывочного гидромониторного узла

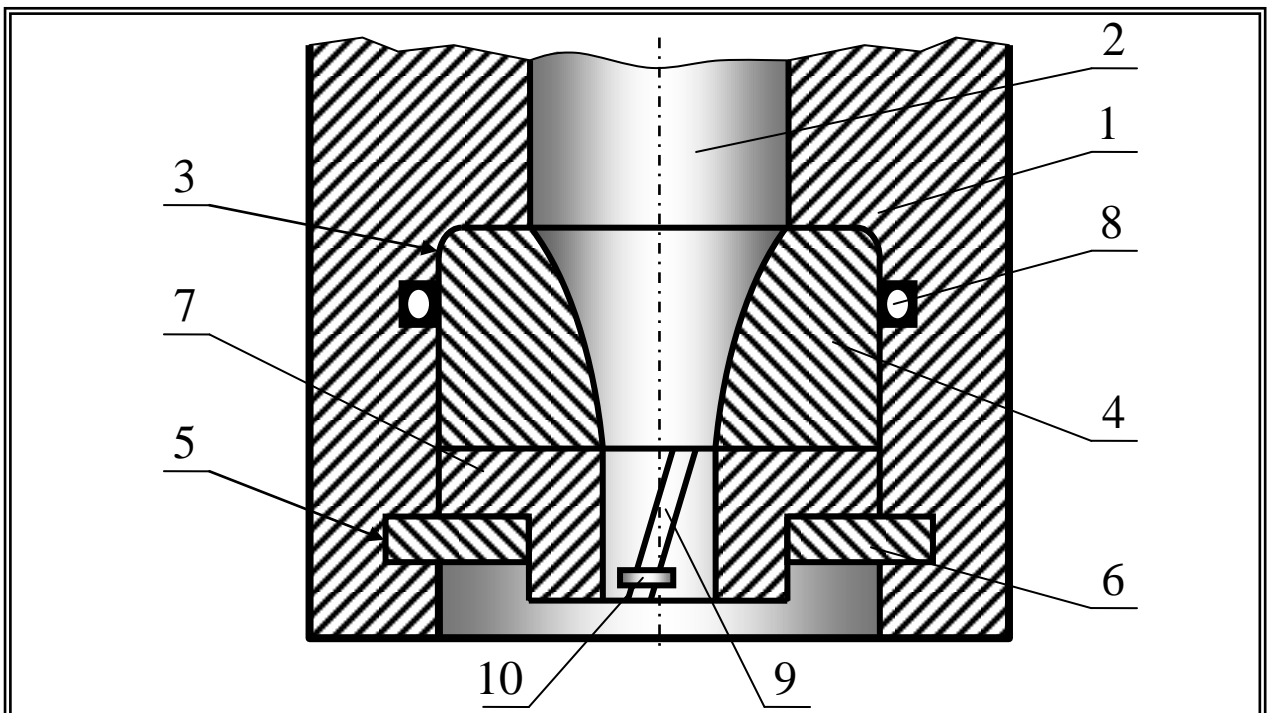


Рисунок 5.3 - Схема промывочного гидромониторного узла

тогда, когда суммарная высота паза 7 на внешней поверхности гидромониторной насадки 4 не меньше высоты фиксирующего устройства 8. Герметизация насадки осуществляется уплотнительным элементом 9, размещенным в канавке между гнездом 3 и насадкой 4.

Монтаж узла сводится к следующему. В гнезде 3 устанавливают насадку 3 с уплотнительным элементом 9 и фиксаторами 8. После этого долото, поворачивают на  $180^{\circ}$  по вертикали и в расточке кольцевой 5 фиксируют стопорное кольцо 6. Далее долото снова переворачивают на  $180^{\circ}$  и фиксаторы 8 принимают рабочее положение, предотвращая выпадение как самого кольца, так и насадки 4. Демонтаж гидромониторного промывочного узла производится в обратной последовательности.

Достижение технического результата согласно 2-му варианту осуществляется за счет того, что конструкция промывочного узла ШБИ предусматривает установку имеющего в продольном сечении ступенчатую форму дополнительного разрезного кольца. Причем это кольцо устанавливается между поверхностью нижнего торца насадки и верхней поверхностью торца разрезного стопорного кольца. При этом обеспечивается возможность контактирования внешней поверхности ступени меньшего диаметра с внутренней поверхностью стопорного кольца [67].

Изготовление насадки с еще одним разрезным кольцом с определенной высотой и толщиной даст возможность свести к минимуму вероятность выпадения главного стопорного кольца и соответственно увеличить надежность работы гидромониторного промывочного узла. В связи с этим нужно, чтобы усилие, сжимающее дополнительное кольцо, всегда было больше соответствующего усилия, создаваемого промывочной жидкостью при максимально возможных перепадах давления, возникающих в процессе работы ШБИ.

Гидромониторный узел промывки (рисунок 5.3) состоит из корпуса 1, имеющего канал 2 и гнездо 3 для размещения насадки 4. В гнезде 3 выполнена кольцевая расточка 5 для стопорного кольца 6. Между торцами насадки 4 и стопорного кольца 6 установлено разрезное дополнительное кольцо 7 ступенчатой формы. При этом толщина и длина кольца 7 больше по сравнению с главным кольцом 6, что обеспечивает вспомогательному кольцу 7 большую жесткость по сравнению с основным кольцом 6. Длина и толщина вспомогательного разрезного кольца 7 зависят от режимов промывки, используемых при работе ШБИ. Причем высота и длина вспомогательного кольца 7 должны не допускать сжатия основного стопорного кольца 6, предотвращая его выпадение при максимальных расходах промывочной жидкости. Также возможен вариант фиксации дополнительного кольца 7 от сжатия путем размещения в пазу 9, какого-либо стопора, например скобы 10. Герметизация промывочного узла осуществляется при помощи уплотнительного элемента 8.

Монтаж узла сводится к следующему. В гнезде 3 устанавливают насадку 4 с уплотнительным элементом 8. Далее осуществляют сжатие стопорного кольца 6 и размещают его в расточке 5 гнезда 3. Затем, между торцами насадки 4 и стопорного кольца 6 устанавливают вспомогательное кольцо 7. Поскольку жесткость вспомогательного кольца 7 имеет большую величину, чем у основного 6, то при его сжатии должно использоваться специальное приспособление. При этом верхний торец насадки 4 должен плотно прижиматься к гнезду 3 и дополнительно герметизировать зазоры между торцом насадки 4 с дном гнезда 3, а наружная поверхность ступени меньшего диаметра дополнительного кольца 7 контактирует с внутренней поверхностью основного разрезного кольца 6 и тем самым предотвращает его сжатие, а следовательно, и выпадение как самого кольца, так и насадки 4. Демонтаж гидромониторного промывочного узла производится в прямо противоположной последовательности.

Использование предложенных конструкций [65, 67, 69, 70], даст возможность увеличить надежность промывочной системы бурового инструмента и, как следствие, эффективность его работы.

В настоящее время, в связи с увеличением объемов бурения на форсированных режимах с большими перепадами давлений в промывочных узлах шарошечного бурового инструмента, большое распространение получил способ крепления гидромониторных насадок при помощи стопорных стержней различных конструкций [71, 174]. Суть данного способа заключается в фиксации насадки стопорным стержнем, устанавливаемым в ответные канавки во внутренней стенке узла и наружной поверхности гидромониторной насадки. Главными преимуществами данных промывочных узлов являются конструктивная простота и технологичность изготовления, достаточная надежность, многовариантность геометрии стопорного стержня, а также места его установки относительно гидромониторной насадки. Однако существует и существенный недостаток – сложный демонтаж насадки. Практика эксплуатации показала, что при попытке извлечения стопорных стержней для осмотра или замены гидромониторных насадок в более чем в половине случаев происходит слом их головных частей. В связи с этим в настоящее время разрабатывается множество конструкций стопорных стержней и способов их извлечения, чтобы устранить эту проблему.

Одним из путей решения данной задачи является изготовление стержня в виде цилиндрической пружины, позволяющей зафиксировать оба ее конца на корпусе промывочного узла. Другим конструктивным решением, является применение стопорно-фиксирующего стержня 2 (рисунок 5.4), с глухим отверстием 3, постепенно сужающимся от вершины 5 к хвостовику 4. Эта конструктивная особенность стопорно-фиксирующего

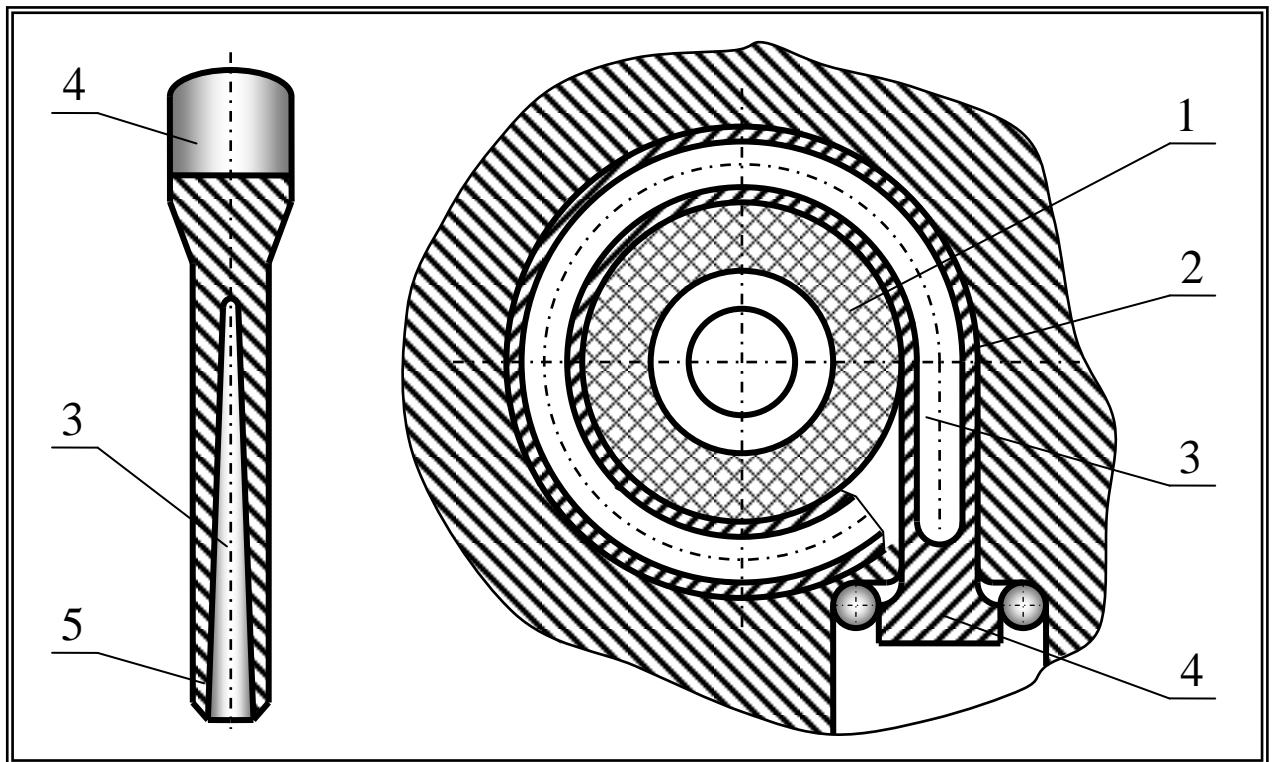


Рисунок 5.4 - Схема крепления гидромониторного промывочного узла  
стопорным стержнем

1 – гидромониторная насадка; 2 – стопорно-фиксирующий стержень; 3 – глухое отверстие; 4 – хвостовик; 5 – вершинная часть

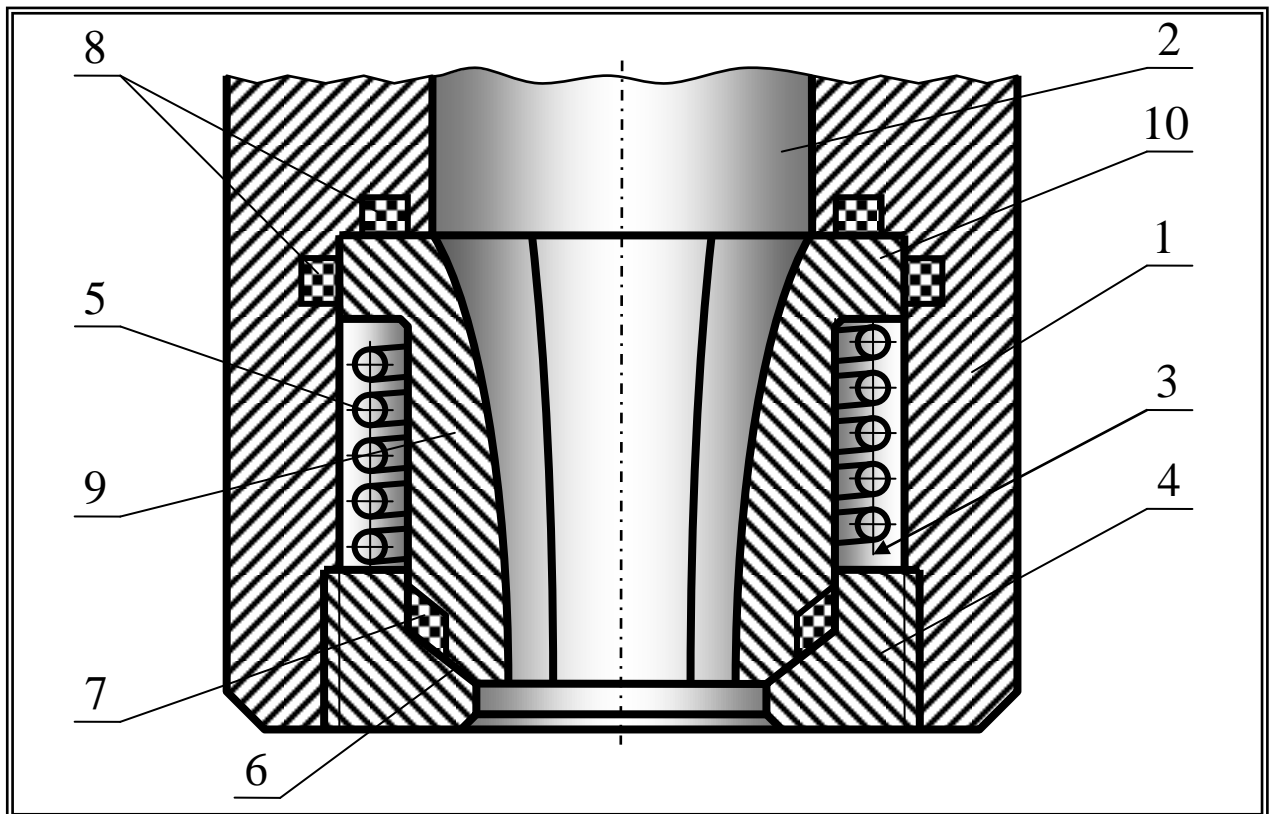


Рисунок 5.5 - Схема промывочного гидромониторного узла  
с резьбовой втулкой

стержня 2 позволяет существенно упростить как его установку за счет большей деформационной податливости, которая увеличивается от хвостовика 4 до вершинной части 5, так и его демонтаж, так как существенно снижается вероятность отрыва хвостовика.

Еще одним направлением в области крепления насадок в промывочных узлах бурового инструмента, получившее широкое практическое применение, является использование резьбовых фиксирующих втулок. Однако, несмотря на все многообразие конструкций промывочных узлов, оснащенных резьбовыми втулками, большинство из них имеют ряд существенных недостатков, таких как сложность их изготовления, особенно с учетом геометрической конфигурации лап шарошечного инструмента, где, как правило, размещаются основные элементы гидромониторных промывочных узлов; надежность фиксации резьбового соединения в условиях повышенных вибрационных нагрузок.

С целью устранения этих недостатков был разработан вариант конструкции, в котором промывочный гидромониторный узел ШБИ состоит из насадки и уплотнительного элемента, закрепленных в специально предусмотренном гнезде промывочного канала корпуса ШБИ резьбовой втулкой, имеющей внутри опорный бурт под торец гидромониторной насадки. Помимо этого, насадка со стороны своей входной части имеет кольцевой бурт, внешняя поверхность которого предусматривает возможность взаимодействия с боковой поверхностью гнезда, а обращенные друг к другу торцы резьбовой втулки и бурта насадки разъединены упругим элементом [68]. Также промывочный гидромониторный узел имеет вспомогательные уплотнительные элементы, которые размещены между контактирующими поверхностями кольцевого бурта насадки и стенками гнезда канала промывки (рисунок 5.5).

Изготовление насадки с использованием кольцевого бурта у входного торца и оснащение промывочного узла упругим элементом между торцами кольцевого бурта и резьбовой втулки позволяют создать дополнительное усилие, гарантированно обеспечивающее плотное прижатие торца насадки к гнезду. Это увеличивает надежность герметизации, а также предотвращает самопроизвольное развинчивание резьбовой втулки. Улучшению герметизации узла также способствует и использование дополнительных уплотнительных элементов, размещенных между контактирующими поверхностями кольцевого бурта насадки и стенками гнезда промывочного канала.

Промывочный узел бурового долота включает насадку 9, а также уплотняющий элемент 7, которые закреплены в гнезде 3 канала 2 корпуса 1 резьбовой втулкой 4 с буртом 6, сформированным на внутренней поверхности, смежной с нижним торцом насадки 9. Насадка 9 имеет со стороны входной части кольцевой бурт 10. Между обращенными друг на друга торцами резьбовой втулки 4 и бурта 10 расположен пружинящий элемент 5, задача которого не только поджимать кольцевой бурт 10 насадки 9 к гнезду 3, но и воздействовать на резьбо-

вую втулку 4 и предохранять ее от развинчивания. Герметизация промывочного узла обеспечивается уплотнительным элементом 7 и дополнительными уплотнительными кольцами 8, которые установлены между контактирующими поверхностями кольцевого бурта 10 насадки 9 и стенками гнезда 3 промывочного канала.

Применение предложенного промывочного узла позволяет значительно повысить надежность его работы благодаря улучшению герметизации и предохранению резьбовой втулки от развинчивания.

Таким образом, разработанные варианты конструкций гидромониторных узлов позволят увеличить надежность систем промывки инструмента и, как следствие, повысить эффективность работы ШБИ.

## **5.2 Исследование процесса истечения струи из гидромониторных насадок с асимметричным поперечным сечением**

Как известно, к основным требованиям, обеспечивающим качественную работу различных систем промывки скважин, относятся следующие:

- промывочный агент должен обеспечить условия, позволяющие эффективно механически разрушать породу забоя за счет создания определенного гидродинамического давления на зоны забоя, подвергаемые разрушению;
- поток промывочного агента должен с минимальными затратами энергии осуществлять отделение частиц разрушенной породы от забоя, их подхват и эвакуацию, при этом исключить вероятность их повторного перемалывания зубьями вооружения ШБИ, зашламление подшипниковых узлов и повышенное изнашивание козырьков лап;
- при бурении долотами с боковыми гидромониторными узлами промывочная жидкость должна эффективно разрушать породу в зоне предразрушения, в связи с тем, что сложение механического воздействия зубьев ШБИ и гидродинамического действия потока способствуют более успешному отрыванию ядра от массива, а также значительных кусков горной породы, не полностью отделенных трещинами от массива, чисто механическим воздействием.

Известно, что пьезометрический напор в гидромониторной насадке переходит в скоростной. При этом истекающая высокоскоростная струя очистного агента из гидромониторной насадки с цилиндрической формой внутреннего поперечного сечения обладает цилиндрической формой, равномерным полем распределения скоростей и относительно низким пьезометрическим напором. Удаляясь от нижней кромки насадки, струя постепенно расширяется и интенсивно захватывает жидкость из граничащих с ней областей, приобретая форму конуса. По периферии конусообразного потока, в зоне захватывания жидкости из прилегающих



областей, величины скоростей достаточно низкие, в то время как в центральной части конуса скорости продолжают оставаться высокими, причем на расстояниях, равных сумме нескольких внутренних диаметров гидромониторной насадки. Когда расстояние от выходного торца насадки становится равным десяти и более ее внутренним диаметрам, скорость потока струи существенно уменьшается и одновременно происходит частичное восстановление пьезометрического напора. Чем отдаленней насадка от забоя, тем интенсивнее расширение струи и соответственно меньше скорость и больше статическое давление. В связи с этим, при размещении насадок на значительном расстоянии от поверхности забоя существенно увеличиваются площадь воздействия струи и дифференциальное давление, что серьезно ухудшает отрыв и удаление частиц разбуриваемой породы.

Повышение качества очистки призабойной зоны только за счет простого увеличения расхода промывочной жидкости, без продуманных конструкторских решений, позволяющих должным образом сориентировать промывочные узлы, максимально возможно приблизить их к поверхности забоя и улучшить гидравлическое совершенство гидромониторных насадок, как показывает практика малоэффективно. Это приводит лишь к возрастанию дифференциального давления действующего на забой, из-за увеличения потерь напора в области работы инструмента вследствие больших площадей, подвергаемых воздействию избыточного давления и повышенному абразивному износу как вооружения, так и бурового инструмента в целом.

Более логичным и эффективным направлением является осуществление подвода к гидромониторной насадке строго определенного расхода, а необходимый перепад давлений в насадках достигать за счет скорости истечения потока, которая в свою очередь должна выбираться из условий качественной очистки, заключающейся в способствовании интенсификации механического разрушения породы на забое струями промывочного агента.

Чем меньше расстояние от гидромониторной насадки до поверхности забоя, тем больше величина скорости истечения промывочной жидкости и соответственно меньшие значения дифференциального давления. При этом нужно учитывать, что если истечение струи происходит под определенным углом к поверхности забоя, на некоторых его участках создаются дополнительные условия для снижения давления. В свою очередь при повышенном гидродинамическом давлении струи на шероховатый забой происходит возрастание напряжений растяжения и сдвигающих деформаций, что существенно повышает эффективность разрушения горной породы.

Важной задачей при разработке ШБИ, оснащенного гидромониторными узлами, является выбор оптимального расстояния гидромониторных насадок до забоя, геометрической формы насадок, а также направление действия струй. При этом главной трудностью является

правильное с точки зрения протекания гидродинамических процессов размещение насадок и их конструктивных элементов в корпусе ШБИ. Для того чтобы приблизить гидромониторные насадки к поверхности забоя, их приходится размещать в межшарошечном пространстве, что неизбежно ведет к необходимости уменьшать размеры шарошек и, как следствие, их опоры и вооружение, что оказывает крайне негативное влияние на их прочность и работоспособность.

Частично решить данную проблему можно путем дальнейшего совершенствования основных геометрических параметров самих гидромониторных насадок. Улучшая гидравлическое совершенство сопел насадок, возможно значительно увеличить область постоянных скоростей истекающих из них струй промывочного агента, что в свою очередь позволит усатанавливать гидромониторные узлы на более значительном удалении от поверхности забоя, при этом без потери разрушающего воздействия потока на разрушаемую породу.

Как известно, геометрия внутреннего поперечного сечения выходного отверстия гидромониторной насадки существенно влияет на конфигурацию и размеры струи, а также на направление и мощность струи промывочного агента. [11, 42, 43, 146].

Для того чтобы определить, как это влияние сказывается на основных характеристиках струи, на основе программного модуля Ansys была разработана математическая модель целевой гидромониторной насадки, с внутренним асимметричным поперечным сечением (рисунок 5.6). Данная конструкция обусловлена тем, что было необходимо определить поведение струи, истекающей из щели, имеющей две противоположные стороны, выполненные в виде двух несимметричных угловых поверхностей.

Проведение CFD (структурно-жидкостная динамика) расчёта, осуществлялось на базе программного комплекса ANSYS Fluent. Поэтому для описанной выше геометрии потребовалось создание сеточной модели гидромониторной насадки диффузорного типа (рисунок 5.7). Наложение конечно-элементной сетки осуществлялось при помощи сеточного генератора Ansys Meshing, при этом конечные элементы были выбраны в виде тетраэдров, однако по стенкам накладывался пограничный слой из элементов призматической формы. Отвечающий за качество сеточной модели параметр, то есть максимальная скошенность ячеек, была выбрана равной не более 0,82 [9].

При проведении расчетов за модель турбулентности была принята стандартная "k – e" модель [32]. Основным соотношением при определении  $\mu_T$  в "k – e" модели является связка Колмогорова - Прандтля [122]:

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5.1)$$

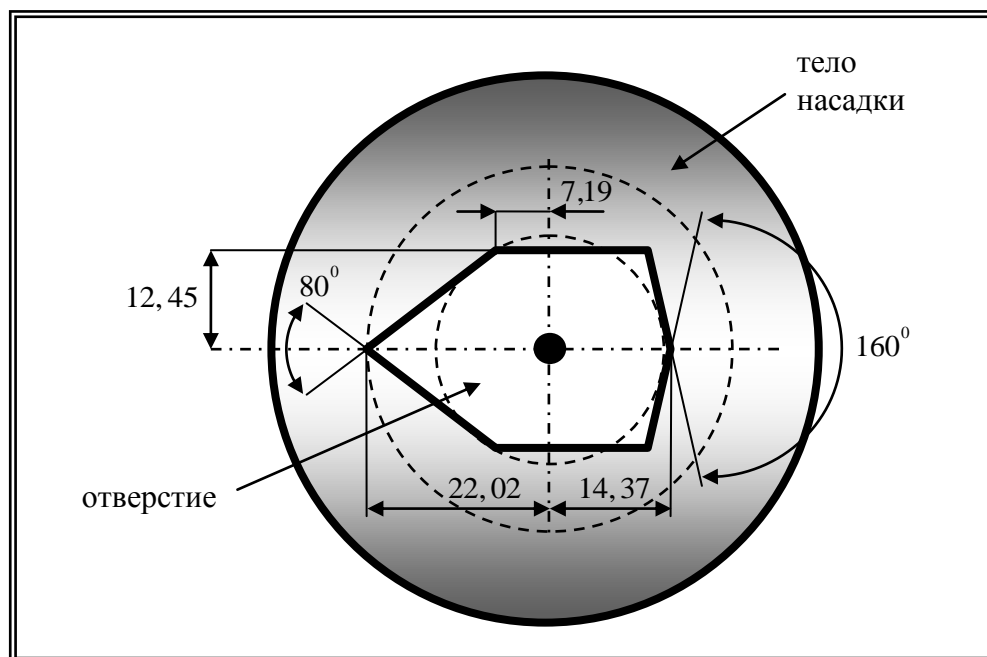


Рисунок 5.6 - Геометрия асимметричной щелевой гидромониторной насадки

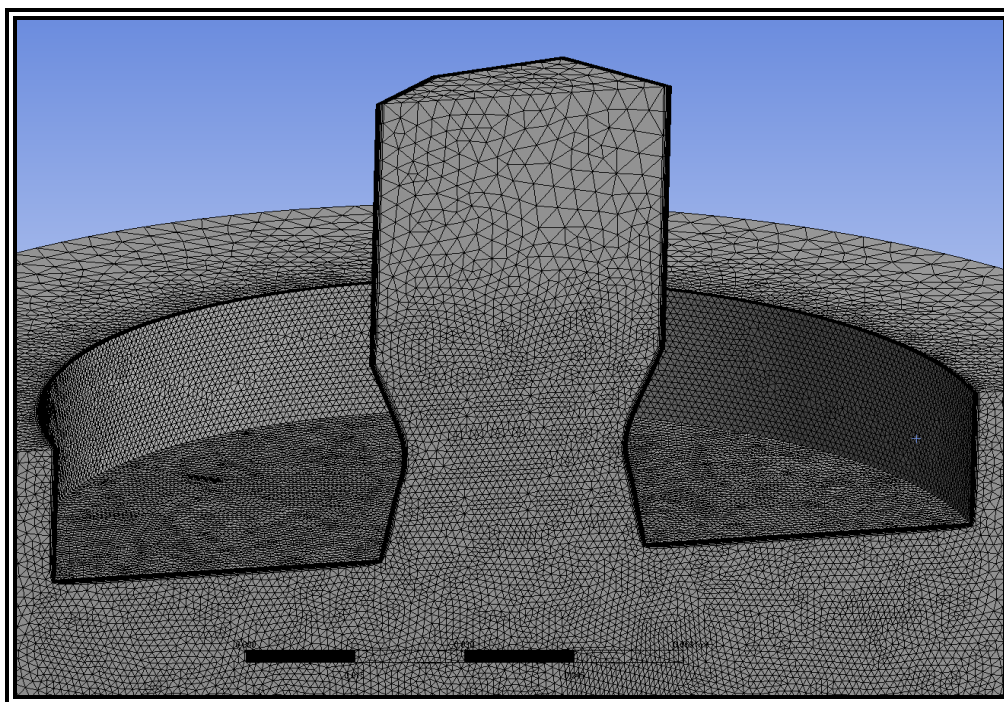


Рисунок 5.7 - Сеточная модель асимметричной щелевой гидромониторной насадки

где

$C_\mu = 1,44$  – константа эмпирическая;

$\mu_T$  – коэффициент, характеризующий турбулентную вязкость;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$k$  – энергия кинетическая турбулентная. Данный параметр отвечает за генерирование турбулентного образования

$$k = \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}{2}, \quad (5.2)$$

где

$\overline{u'}$ ,  $\overline{v'}$ ,  $\overline{w'}$  – соответствующие проекции на оси координат скорости пульсации;

$\varepsilon$  – скорость диссипации кинетической турбулентной энергии. Данный параметр характеризует рассеивание турбулентного образования

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left[ \overline{\left( \frac{du'}{dx} \right)^2} + \overline{\left( \frac{dv'}{dy} \right)^2} + \overline{\left( \frac{dw'}{dz} \right)^2} \right]. \quad (5.3)$$

Для изотропной турбулентности

$$u' = v' = w'; \quad k = \frac{3}{2} \overline{u'^2}. \quad (5.4)$$

$$\varepsilon = \frac{3\mu}{\rho} \overline{\left( \frac{du'}{dx} \right)^2}, \quad (5.5)$$

при этом

$\mu$  – вязкость жидкости, Па с.

Определение турбулентных параметров  $k$  и  $\varepsilon$  осуществляется с использованием двух дифференциальных уравнений в частных производных.

Тогда уравнение, характеризующее перенос кинетической турбулентной энергии, примет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{d(\rho k)}{dt} + \frac{d(\rho uk)}{dx} + \frac{d(\rho vk)}{dy} + \frac{d(\rho wk)}{dz} = \\ & = \frac{d}{dx} \left( \frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{dk}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left( \frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{dk}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left( \frac{\mu_T}{\sigma_T} \frac{dk}{dz} \right) + \mu_T F - \rho \varepsilon + \frac{C_4 \beta \mu_T}{\sigma_T} \left( X \frac{dT}{dx} + Y \frac{dT}{dy} + Z \frac{dT}{dz} \right). \end{aligned} \quad (5.6)$$

А уравнение переноса скорости диссипации кинетической турбулентной энергии запишется как

$$\frac{d(\rho\varepsilon)}{dt} + \frac{d(\rho u\varepsilon)}{dx} + \frac{d(\rho v\varepsilon)}{dy} + \frac{d(\rho w\varepsilon)}{dz} = \frac{d}{dx}\left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dx}\right) + \frac{d}{dy}\left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dy}\right) + \frac{d}{dz}\left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dz}\right) + C_{1\varepsilon}\mu_T \frac{\varepsilon}{k} F - C_{2\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{C_\mu(1-C_3)\beta\rho k}{\sigma_T} \left( X \frac{dT}{dx} + Y \frac{dT}{dy} + Z \frac{dT}{dz} \right). \quad (5.7)$$

Обозначения, используемые в данных уравнениях, точно такие же, как и в приведенных выше:  $a$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $\beta$ ,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_\mu$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  - эмпирические константы. Значение этих постоянных получено путем анализа данных многочисленных экспериментов и может использоваться для множества задач, связанных с моделированием течений. Выбор модели турбулентности должен осуществляться на основании следующих критериев:

- необходимо, чтобы модель была уже многократно апробированной при рассмотрении задач данного класса, чтобы обеспечить удовлетворительное качественное и количественное описание турбулентных эффектов;
- необходимо, чтобы модель была достаточно удобной и простой в плане вычислений, легко алгоритмироваться и основываться на параметрах, которые могут быть определены однозначно и с достаточной точностью;
- необходимо, чтобы модель характеризовалась высокой эффективностью с точки зрения осуществления вычислений, то есть, ее использование не должно приводить к значительному увеличению времени счета.

При проведении исследований, связанных с изучением течений газов, как правило, задаются следующие граничные условия: на входе Mass flow inlet или Pressure inlet, на выходе Pressure outlet. При проведении настоящих расчетов были заданы следующие условия: входная граница - Mass flow inlet, с массовым расходом 10 кг/с и температурой 265 К; выходная граница - Pressure outlet, с давлением 101325 Па. Прочие зоны - Wall.

В результате проведенных расчетов, были выявлены картины истечения промывочного агента из гидромониторной насадки изучаемой конструкции, а также поля распределения и величины параметров в интересующих зонах потока (рисунок 5.8). Было установлено, что в случае прохождения потока жидкости сквозь насадку с фасонным внутренним поперечным сечением (рисунок 5.7), происходит некоторое отклонение данного потока в вертикальной плоскости в сторону большего из углов. Возможно, это связано с тем, что величина пограничного слоя жидкости, образующегося между ее основным потоком и внутренними стенками данной насадки, в области острого угла больше, чем в области тупого. Поэтому смещение центра масс потока происходит в сторону большего угла. Данное предположение наглядно подтверждается полученными результатами (рисунок 5.8), где демонстрируются величины направления скоростей, а также распределения их векторов по сечению насадки.

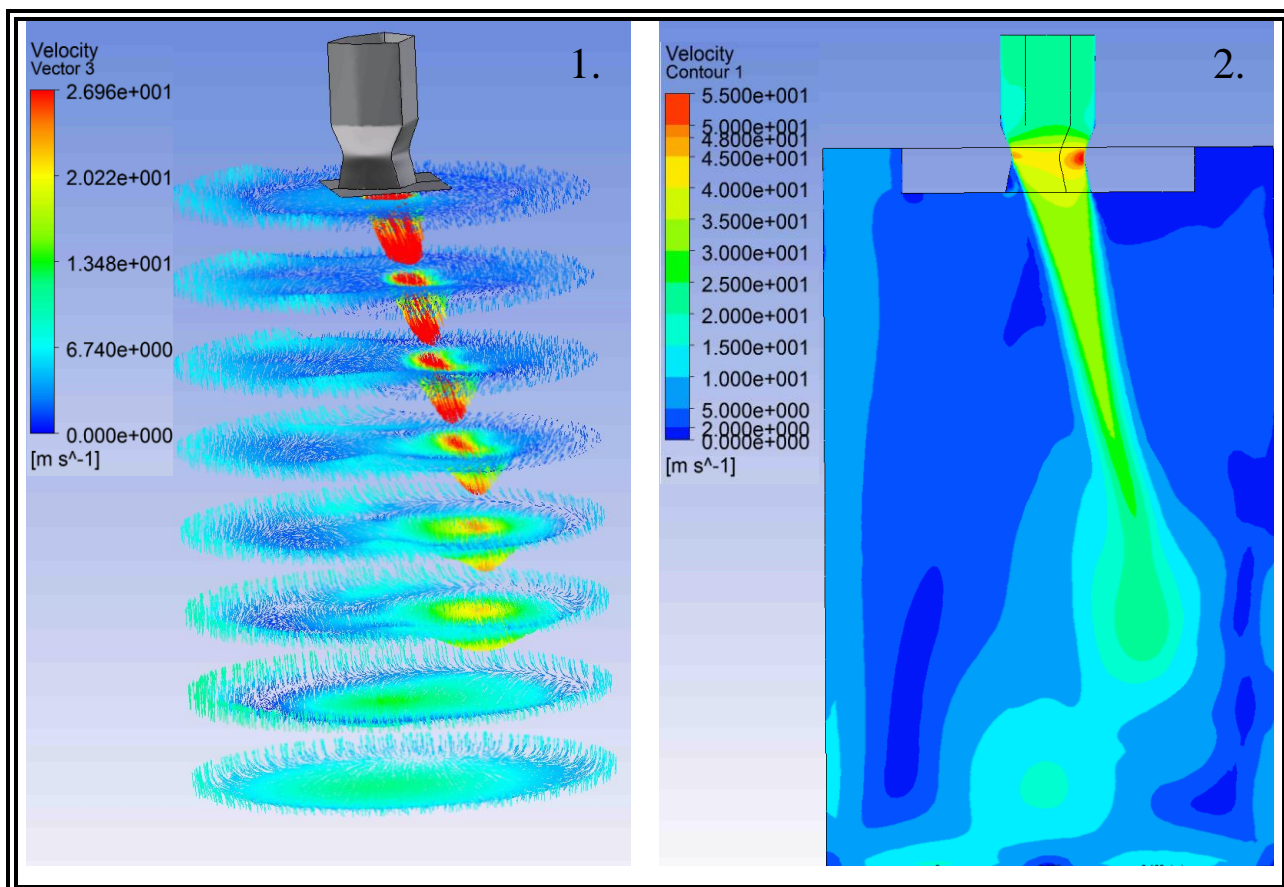


Рисунок 5.8 – Схема распределения полей скоростей по вертикали

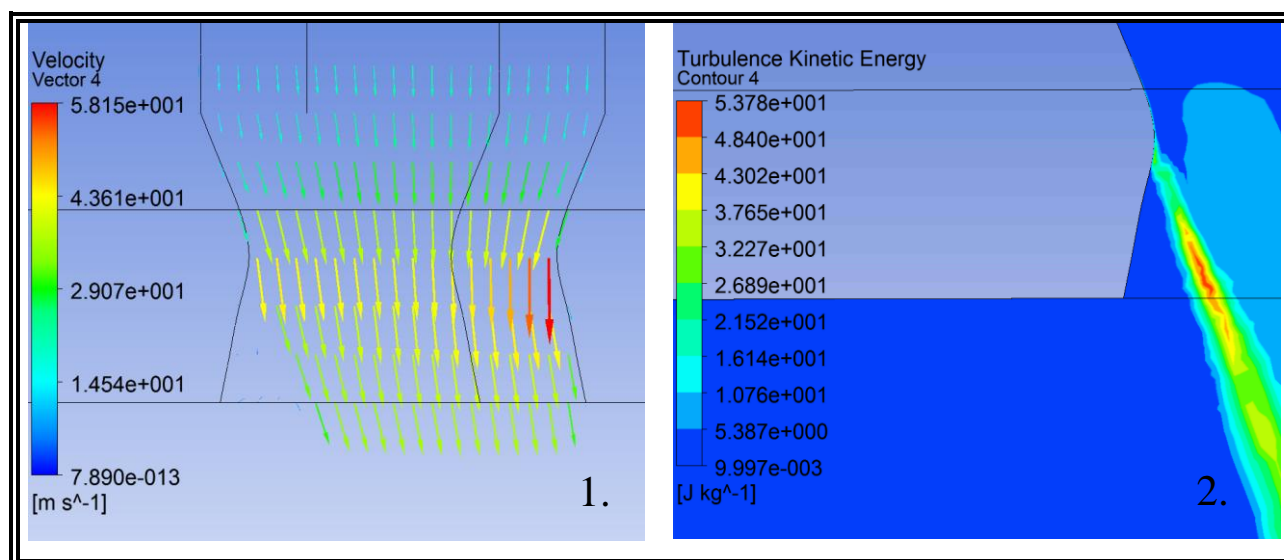


Рисунок 5.9 - Схема распределения полей скоростей при переходе конфузорной в диффузорную часть насадки

Из (рисунок 5.9.1) видно, что в сечении, расположенном непосредственно после завершения конфузурной части насадки, вектора большей величины расположены ближе к большему из углов. Одновременно с этим в ее диффузорной части, в районе острого угла, наблюдается частичное отрывание пограничного слоя от поверхности стенки насадки, что приводит к образованию ламинарно-турбулентных переходов и обратно-вихревых течений струи. Воздействие указанных факторов на поток промывочной жидкости в этой зоне насадки приводит к тому, что происходит отклонение струи в сторону угла большей величины.

Объяснение этого явления заключается в следующем. Как известно, течение жидкости в пограничных слоях значительно зависит от градиентов давлений, действующих на эти слои. Возникающие на стенке насадки напряжения трения - положительны. В свою очередь, градиент давления, имеющий положительное значение, ведет к значительному торможению жидкости в околостеночной области пограничного слоя. Напряжения трения на поверхности уменьшаются и обнуляются в некоторой точке, называемой точка отрыва. В процессе подхода потока к этой точке происходит резкое возрастание поперечной составляющей вектора его скорости. До точки или места отрыва нулевая линия потока расположена на поверхности обтекания. После прохождения потоком этой точки нулевая линия отрывается на некоторое расстояние от стенки насадки и разделяет область возвратно-вихревого течения от основного потока промывочной жидкости. При этом напряжения трения становятся отрицательными.

Из (рисунок 5.9) видно, что в области расположения острого угла появляются силы, способствующие отклонению струи в сторону угла, расположенного напротив, и одновременному смещению центра струи в этом же направлении. Из основ гидрогазодинамики известно, что одним из основных факторов воздействия на гидравлическую среду, заставляющего жидкость перемещаться из области повышенного в область пониженного давления, является перепад или разность давлений.

Зависимости, представленные на (рисунок 5.10), характеризуют изменения давления в районе критического сечения насадки. Из графиков видно, что давление в области тупого угла ниже, чем в области острого. Следовательно, можно констатировать, что в процессе истечения жидкости из гидромониторной насадки щелевого типа противоположные угловые стороны которой представляют углы разной величины, создаются условия для отклонения потока в направлении угла большей величины. В свою очередь, любое сжатие потока неминуемо приводит к повышению скорости его течения. В связи с этим, возникло предположение о том, что при «совмещении» в одно целое нескольких асимметричных одинаковых насадок, каждая из которых отклоняет струю от вертикали с одинаковой для всех силой  $F_{от}$ , и при этом равномерно распределить их в описанной вокруг них окружности, то с учетом того, что  $F_{от}^1 = F_{от}^2 = F_{от}^3$ , будет происходить уравновешивание всех отклоняющих потоков. В

результате, суммарная струя промывочной жидкости не будет иметь отклонения от вертикали, а равномерное дополнительное поджатие струи позволит увеличить скорость потока  $F$  в его центральной области (рисунок 5.11).

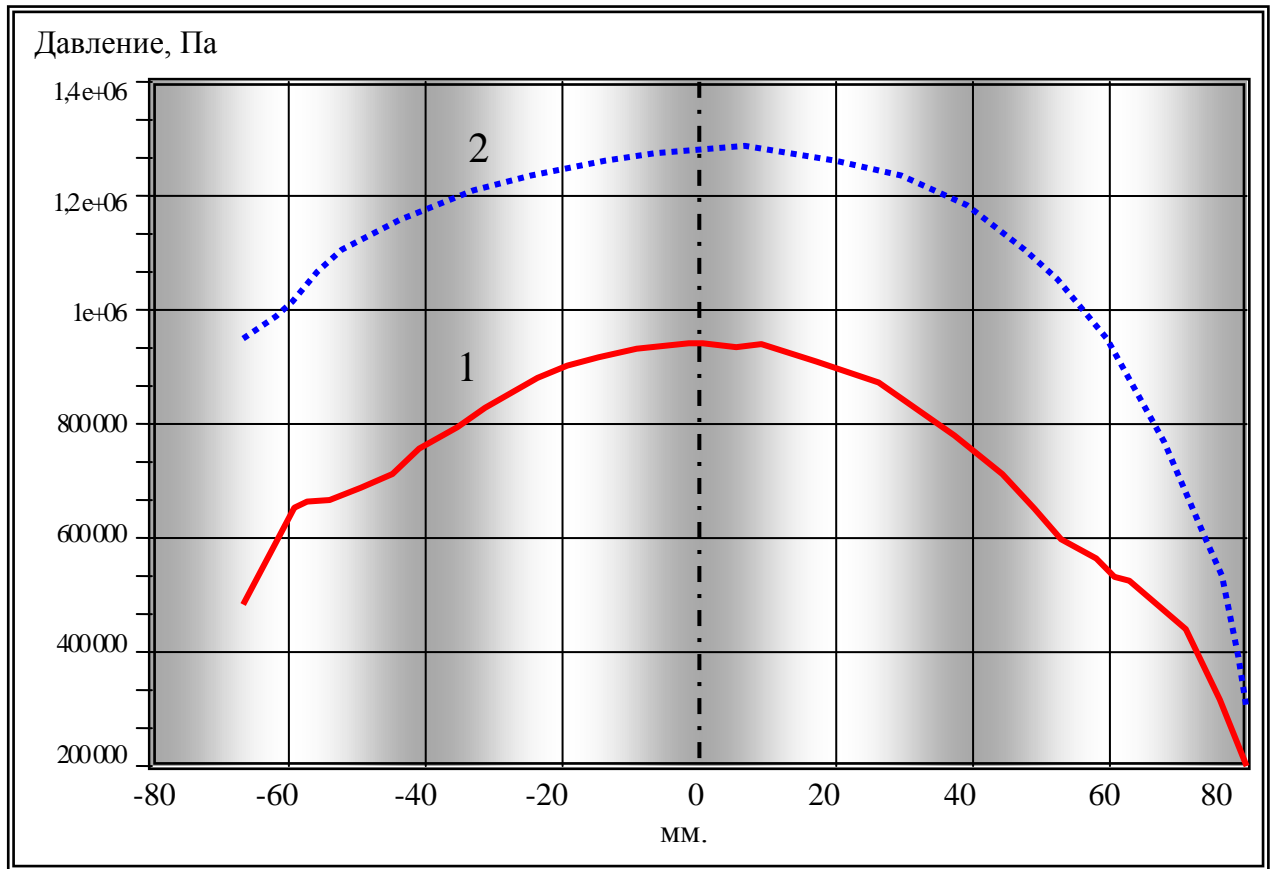


Рисунок 5.10 – Характер распределения давлений на выходе из гидромониторных насадок.

1 - насадка щелевая асимметричная; 2 - насадка шестигранная асимметричная

Для того чтобы подтвердить или опровергнуть это предположение при помощи программного модуля Ansys, были построены модели двух гидромониторных насадок: диффузорного типа, с внутренним круглым поперечным сечением и внутренним шестигранным асимметричным поперечным сечением (рисунок 5.12). Одной из особенностей построения данных моделей, является то, что площади одноименных сечений внутренних отверстий каждой из насадок имеют одинаковые величины

$$S_K = S_{A6}; \quad \pi r_1^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} r_2 R_2, \quad (5.8)$$

где

$S_K$  – площадь внутреннего круглого сечения насадки, мм<sup>2</sup>;

$S_{A6}$  - площадь внутреннего асимметричного шестигранного сечения насадки, мм<sup>2</sup>;



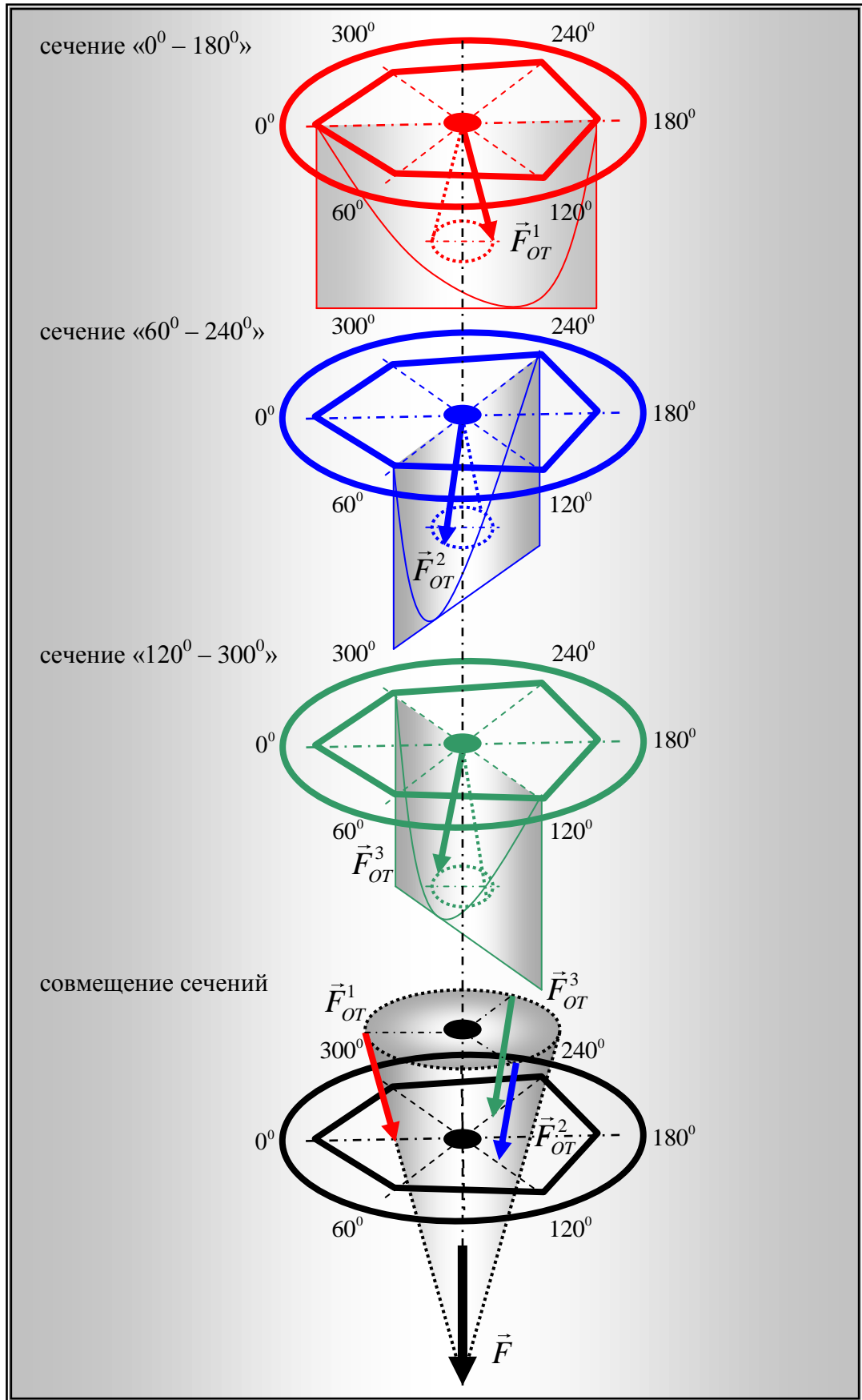


Рисунок 5.11 - Принципиальная схема наложения поперечных сечений

$r_1$  – радиус внутреннего круглого сечения насадки, мм;

$r_2$  и  $R_2$  – радиусы окружностей, описанных вокруг вершин острых и тупых углов внутреннего шестигранного асимметричного сечения насадки, мм.

Для того чтобы обеспечить корректное сравнение двух видов гидромониторных экспериментальных насадок, в процессе проведения моделирования, на входе была задана одинаковая скорость потока промывочного агента (жидкости), а также массовый расход сквозь шестиугольную асимметричную насадку равнялся массовому расходу сквозь насадку с круглой формой внутреннего поперечного сечения. В результате проведенных расчетов были получены графики распределения скоростей промывочной жидкости для двух видов насадок - с шестигранным асимметричным и круглым поперечным сечением (рисунок 5.13).

На представленных графиках указаны значения скоростей потока промывочной жидкости в продольном сечении изучаемой области, находящейся после нижнего среза гидромониторной насадки. Представленные кривые для каждой из исследуемых насадок характеризуют распределение скоростей потока в поперечном сечении струи в определенной координате по оси  $Z$ , располагающейся по ходу движения потока промывочной жидкости.

Верхняя кривая характеризует распределение скоростей в сечении, расположенном непосредственно на выходном торце гидромониторной насадки, соответственно нижняя кривая характеризует распределение скоростей потока промывочной жидкости в приповерхностной зоне забоя.

Анализ геометрических форм и скоростных характеристик, истекающих из исследуемых гидромониторных насадок струй, показал, что в сравнении с классической насадкой, имеющей круглую форму внутреннего поперечного сечения, гидромониторная насадка с внутренним шестигранным асимметричным поперечным сечением имеет большую зону постоянных скоростей и большие углы расширения струи. Одновременно с этим была установлена еще одна закономерность. Струя, истекающая из гидромониторной насадки с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением, на выходе из нее также в поперечном сечении имеет форму асимметричного шестиугольника, однако по мере удаления ее от нижнего среза насадки постепенно принимает обычную круглую форму.

Этот эффект, заключающийся в сохранении геометрической формы поперечного сечения струи, может с успехом использоваться при разработке новых узлов и систем промывки, предназначенных для оснащения различных видов и типов ШБИ, потому что геометрии истекающих струй оказывают существенное влияние на формирование и распределение основных потоков промывочного агента (жидкости) не только в области работы вооружения, но и во всей призабойной зоне.

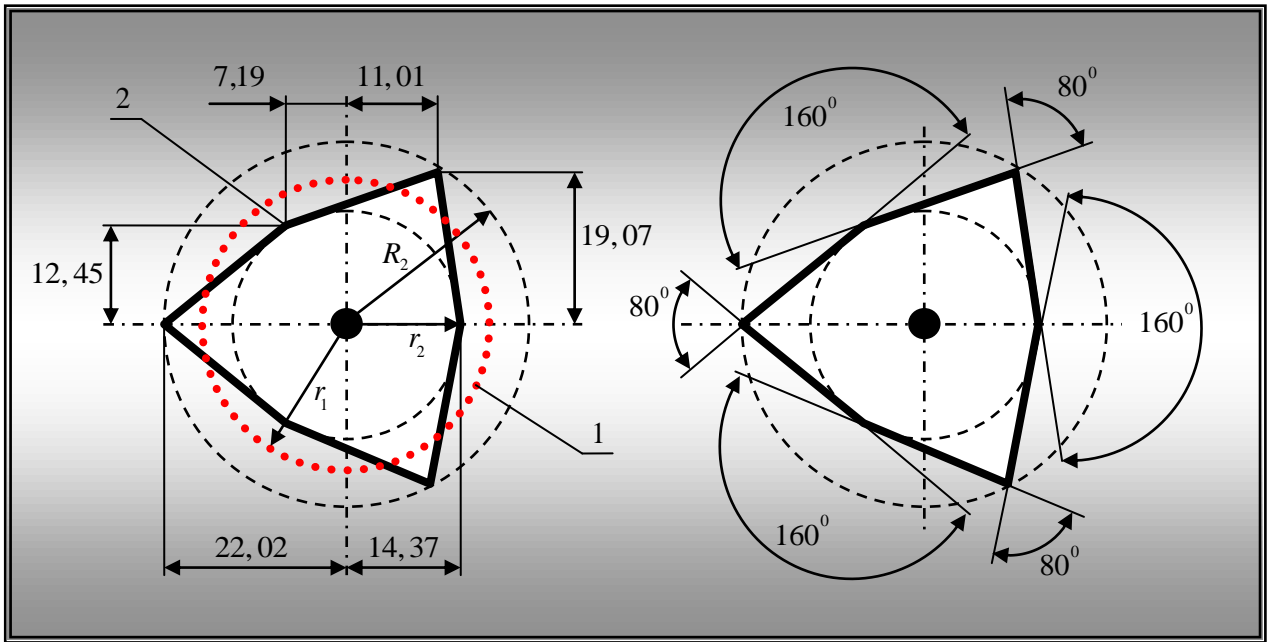


Рисунок 5.12 - Геометрические параметры асимметричного шестиугольного сечения

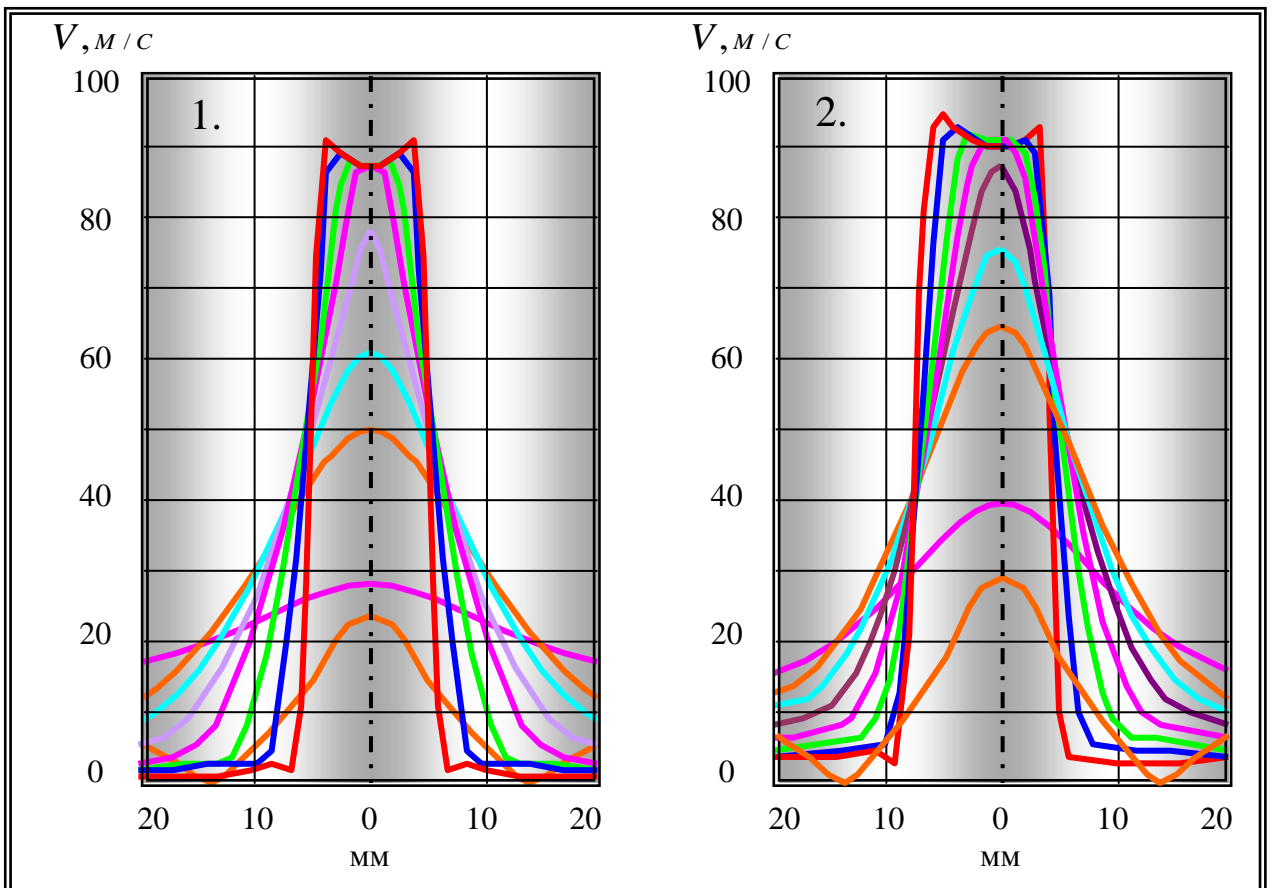


Рисунок 5.13 - Распределение скоростей по вертикали  
1 - сечение круглое; 2 - сечение шестигранное асимметричное

К примеру, если придать струям, истекающим из боковых гидромониторных насадок конфузорного типа, формы многоугольников, то появится возможность изначально сориентировать угловые части струй, имеющих большую тенденцию к их расширению, в направлении межшарошечного пространства и в районы работы периферийных венцов соседних шарошек, что позволит одновременно очищать не только основные, но и периферийные венцы сразу двух смежных шарошек.

Это даст возможность значительно улучшить очистку зубчатого вооружения ШБИ, в особенности самоочищающихся конструкций, при бурении скважин в глинистых породах, склонных к образованию сальников.

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что путем изменения геометрии внутреннего поперечного сечения гидромониторных насадок можно не только влиять на форму, но и существенно увеличить скорость истечения в средней части струи промывочной жидкости. Что, в свою очередь, дает возможность повысить не только эффективность работы гидромониторных узлов, но и систем промывки ШБИ в целом.

### **5.3 Разработка конструктивной схемы центрального гидромониторного узла шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением**

Одними из основных задач при осуществлении бурения нефтяных и газовых скважин являются повышение механической скорости и увеличение проходки на инструмент.

Многочисленные лабораторные исследования и промышленные испытания показали, что одними из наиболее действенных способов повысить эффективность шарошечного бурового инструмента являются совершенствование существующих и создание новых промывочных систем, позволяющих наряду с увеличением разрушающего гидравлического воздействия на забой улучшить очистку вооружения и призабойной зоны скважины от выбуренной породы.

Основными условиями, способствующими повышению эффективности работы гидравлической системы бурового инструмента, являются:

- интенсификация разрушения забоя на основе сложения полей напряжений, создаваемых гидравлическим действием струи на область предварительного разрушения и механическим воздействием на породу зубьев вооружения;
- создание равновесного, отрицательного или незначительно избыточного гидродинамического и гидростатического давления струи на разбурываемые участки породы забоя;
- минимизация энергии, затрачиваемой струей промывочной жидкости на отрыв частиц разрушаемой породы от массива;

- оптимизация направлений основных потоков промывочного агента для упрощения процесса удаления разрушенной породы из призабойной зоны и минимизации повторного дробления шлама.

Обеспечение вышеперечисленных условий в основном зависит от расположения, ориентации и конструкций промывочных узлов бурового инструмента.

В настоящее время наибольшее распространение получил ШБИ, оснащенный боковой гидромониторной схемой промывки. Одним из недостатков данного вида бурового инструмента является высокая вероятность образования в его надшарошечной области сальника (в основном при бурении вязких глиносодержащих пород), вызванная тем, что часть разрушенной породы вместе с основными потоками промывочной жидкости устремляется к центру вращения инструмента. Ситуацию усугубляет и частичное перекрытие межлапного пространства промывочными узлами. Все это существенно затрудняет эвакуацию разбуренной породы из призабойной зоны и многократному повторному измельчению шлама, что существенно снижает основные показатели бурения. Поэтому в настоящее время при проходке нефтяных и газовых скважин все большее применение находит ШБИ, оснащенный различными комбинированными схемами промывки, где одновременно используются как центральный гидромониторный узел, так и боковые гидромониторные узлы.

Таким образом, исследования, направленные на дальнейшее совершенствование конструкций центрального гидромониторного узла, являются одними из важных направлений в рамках задачи повышения эффективности работы систем промывки и ШБИ в целом.

Как уже было отмечено ранее, работа ШБИ, оснащенного промывочными узлами с гидромониторными насадками, существенно зависит от эффективности использования энергии потока промывочной жидкости, а также от конструкции самих узлов, позволяющих минимизировать гидравлические потери и при этом направлять струи промывочного агента непосредственно на разрушаемую породу забоя.

В процессе истечения промывочного агента (жидкости) из гидромониторных насадок ШБИ потенциальная энергия жидкости переходит в кинетическую - скоростной напор струи, рассчитываемый как [170]

$$P_C = \frac{\gamma V_0^2}{g} (1 - \cos \varphi), \quad (5.9)$$

где

$P_C$  – давление на поверхность забоя, за счет ударного действия струи, кг/см<sup>2</sup>;

$V_0$  – скорость струи на нижнем торце насадки, м/с;

$\gamma$  – удельный вес промывочной жидкости, г/см<sup>3</sup>;

$\varphi$  – угол отражения струи от поверхности забоя, град.;

$g$  – ускорение силы тяжести,  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;

Однако эта зависимость справедлива только для струи, направленной строго под прямым углом к поверхности забоя. Если же, струя встречается с забоем скважины под углом  $\beta$  отличным от перпендикуляра, то предыдущее выражение трансформируется в

$$P_c = \frac{\gamma V_0^2}{g} (1 - \cos \varphi) \cos \beta. \quad (5.10)$$

Полная сила воздействия струи на породу  $F$  рассчитывается с учетом наклона оси струи по отношению к поверхности забоя:

- при перпендикулярном направлении ( $\beta = 0$ )

$$F = P_c f_0 = \frac{\gamma V_0^2 f_0}{g} (1 - \cos \varphi). \quad (5.11)$$

где

$f_0$  – первоначальная площадь сечения струи,  $\text{м}^2$ ;

- при наклонном направлении под углом  $\beta$ :

$$F = P_c f_0 = \frac{\gamma V_0^2 f_0}{g} (1 - \cos \varphi) \cos \beta. \quad (5.12)$$

Данные формулы справедливы для варианта (рисунок 6.14), т. е. когда расстояние до поверхности забоя от нижнего торца насадки не превышает величину  $l_0$  - зону постоянных скоростей.

На выходе из гидромониторной насадки с круглым поперечным сечением высокоскоростная струя промывочной жидкости обычно обладает цилиндрической формой. Однако, удаляясь от нижнего торца насадки, струя постепенно расширяется за счет захвата окружающей ее жидкости и приобретает конусообразную форму, затормаживаясь и растекаясь. При этом в центре конуса на участке  $l_0$ , равном нескольким диаметральным размерам внутреннего сечения насадки, скорость потока постоянна, а на периферии постепенно уменьшается.

После выхода струи из насадки ее расширение подчиняется линейному закону, а диаметральный размер струи  $d_i$  любого  $i$ -го сечения вычисляется по формуле

$$d_i = d_0 + 2l_i \operatorname{tg} \alpha = d_0 + kl_i, \quad (5.13)$$

где

$d_0$  – начальный диаметр струи, м;

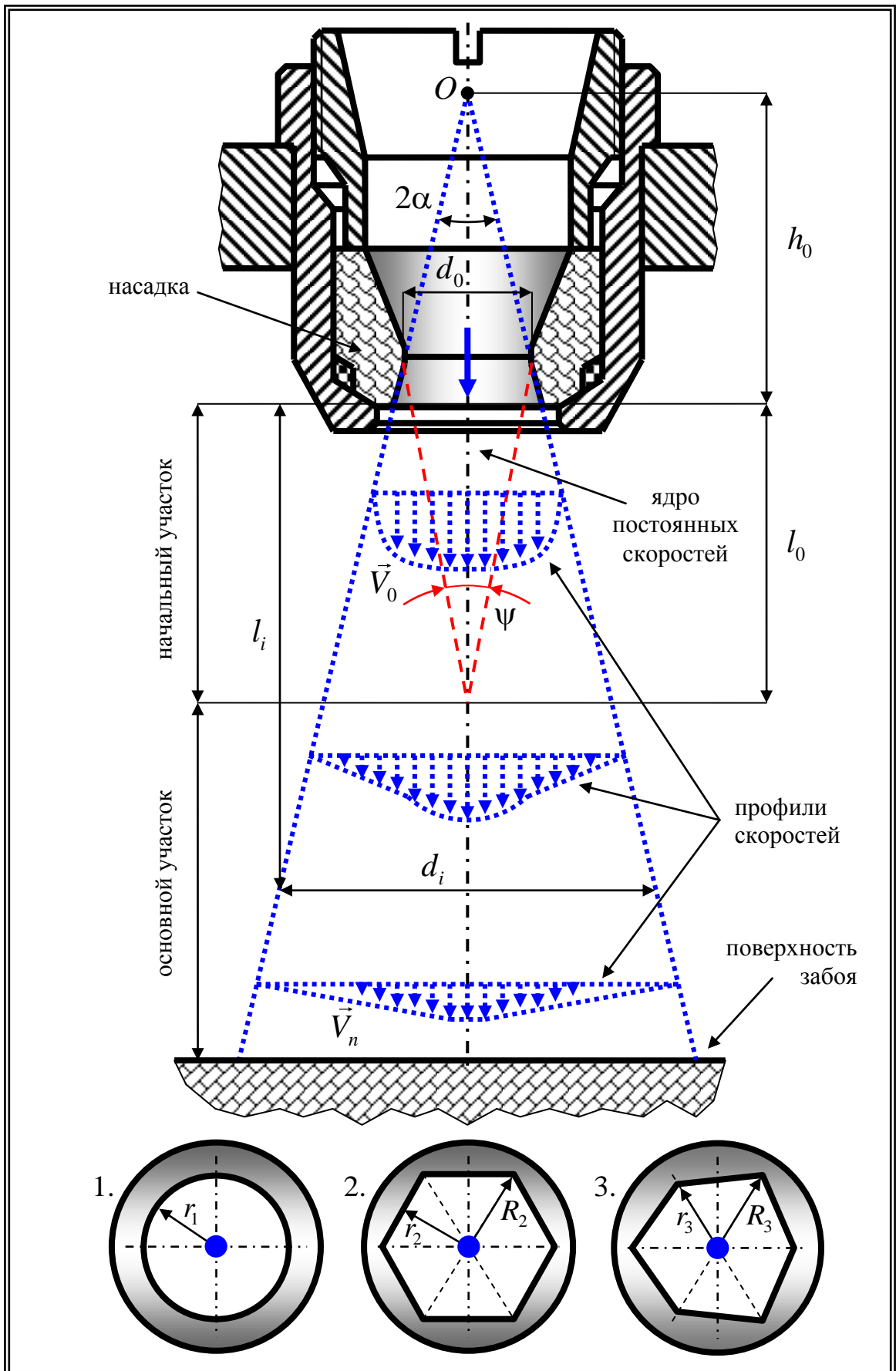


Рисунок 5.14 - Схема затопленной струи, исходящей из гидромониторной насадки  
 1 – круглой; 2 – гексагональной; 3 - асимметричной шестиугольной

$2\alpha$  – угол, характеризующий расширение струи, град.;

$l_i$  – расстояние от нижней кромки насадки до  $i$ -го поперечного сечения струи, м;

$k$  – коэффициент, характеризующий растекание струи.

Одной из основных характеристик, определяющих гидравлическое совершенство гидромониторных насадок, является коэффициент  $k$ . Его величина главным образом определяется конструктивными особенностями насадки, т. е. геометрией входного и выходного отверстий и в меньшей степени длиной канала. Чем ниже у гидромониторной насадки значение коэффициента  $k$ , тем выше ее гидродинамические характеристики. В настоящее время для большинства гидромониторных насадок, используемых для оснащения промывочных узлов шарошечного бурового инструмента,  $k = 0,22 \div 0,25$ .

Анализ представленной зависимости свидетельствует о том, чем дальше расположена насадка от поверхности забоя, тем больше площадь поперечного сечения струи и, следовательно, меньше скорость и больше величина статического давления. В связи с этим, при размещении гидромониторных насадок на значительном расстоянии от поверхности забоя существенно увеличивается площадь поражения забоя струей промывочной жидкости, с одновременным увеличением дифференциального давления, что существенно ухудшает условия, способствующие отрыву частиц породы от массива поверхности забоя и выносу шлама в затрубное пространство.

Таким образом, основными путями повышения эффективности работы шарошечного бурового инструмента, оснащенного гидромониторными узлами, являются: максимальное приближение гидромониторных насадок к поверхности забоя; увеличение скоростных характеристик струи промывочной жидкости; создание условий для беспрепятственного транспортирования шлама из зоны работы инструмента. При этом большое значение имеет усиление поперечных потоков по забою скважины, определяющих своевременную и качественную очистку забоя от бурового шлама.

Как правило, вследствие достаточной сложности процесса анализ параметров струйных течений осуществляется с некоторыми допущениями. Например, осевая скорость струи промывочной жидкости, истекающей из гидромониторного узла, достаточно велика и составляет величину, достигающую до 150 м/с, которая во много раз больше линейной скорости движения периферийных поверхностей шарошечного бурового инструмента (0,4-3 м/с). В связи с этим скоростью вращения бурового инструмента, как правило, пренебрегают. Поэтому с целью исследования основных закономерностей, связанных с распространением струи промывочного агента (жидкости), и определения их параметров достаточно рассмотреть осесимметричную затопленную струю, истекающую из гидромониторного узла бурового инструмента и свободно распространяющуюся в пространстве (рисунок 5.14).



Формально, струю можно представить как бы состоящую из двух областей (рисунок 5.14). Первая область берет свое начало на расстоянии  $h_0$  от полюса струи и заканчивается на нижнем срезе насадки и характеризуется ядром формы конуса длиной  $l_0$  и углом схождения  $\psi$ , в котором скорость промывочной жидкости постоянна и равна скорости ее истечения из нижнего среза насадки.

Вторая область характеризуется наибольшей скоростью потока в средней осевой части струи и наименьшей на ее периферии. В этой области для всех сечений отношение периферийных скоростей потока к его максимальной скорости является функцией, зависящей от радиуса струи.

Размеры первой области существенно зависят от профиля насадки, при этом всегда уменьшаются по длине струи с углом схождения  $\psi$ . Для гидромониторных насадок с прямым профилем  $l_0 = 3d_0$ , а имеющим эллиптический профиль - до  $8d_0$ .

Для того чтобы определить, какое влияние геометрия внутреннего поперечного сечения гидромониторной насадки оказывает на основные характеристики струи, при помощи программного модуля Ansys, были построены модели трех гидромониторных насадок диффузорного типа: с круглым (рисунок 5.15.1), гексагональным (рисунок 5.15.2) и асимметричным шестиугольным (рисунок 5.15.3) внутренними поперечными сечениями. Одной из особенностей построения данных моделей является то, что площади одноименных сечений внутренних отверстий каждой из насадок имеют одинаковые величины [122]:

$$S_K = S_6 = S_{A6}; \quad (5.14)$$

$$\pi r_1^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} R_2^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} r_3 R_3, \quad (5.15)$$

где

$S_K$  – площадь внутреннего круглого сечения насадки, мм<sup>2</sup>;

$S_6$  – площадь внутреннего гексагонального сечения насадки, мм<sup>2</sup>;

$S_{A6}$  - площадь внутреннего асимметричного шестигранного сечения насадки, мм<sup>2</sup>;

$r$  – радиус внутреннего круглого сечения насадки, мм;

$R_{2,3}$  – радиусы окружностей, описанных вокруг вершин углов внутреннего гексагонального и шестигранного асимметричного сечений насадки, соответственно, мм.

Проведение CFD расчёта осуществлялось на базе программного комплекса ANSYS Fluent. Поэтому для описанных выше геометрий потребовалось создание сеточных моделей трех типов насадок (рисунок 5.15). Наложение конечно-элементной сетки осуществлялось

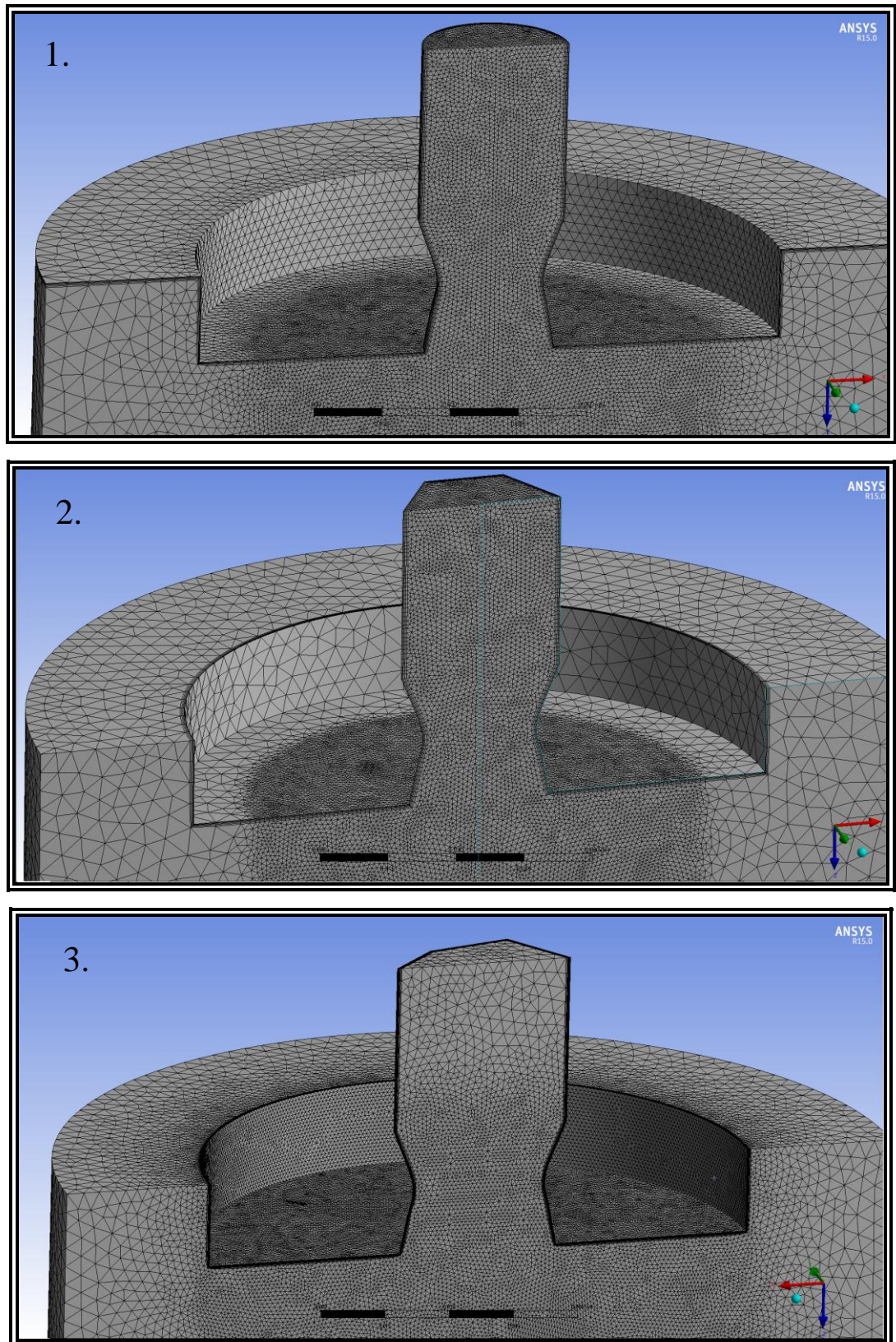


Рисунок 5.15 - Сеточные модели гидромониторных насадок диффузорного типа с различными формами поперечного сечения

1 - круглое; 2 - гексагональное; 3 - шестигранное асимметричное

при помощи сеточного генератора Ansys Meshing, при этом конечные элементы были выбраны в виде тетраэдров, однако по стенкам накладывался пограничный слой из элементов призматической формы. Отвечающий за качество сеточной модели параметр, то есть максимальная скошенность ячеек, была выбрана равной не более 0,82 [122]. При проведении расчетов, за модель турбулентности была принята стандартная " $k - \epsilon$ " модель, описанная ранее (пункт 5.2).

В результате проведенных расчетов были выявлены картины истечения промывочного агента (жидкости) из трех типов диффузорных насадок с круглым, гексагональным и шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением, а также поля распределения и величины параметров в интересующих зонах потока (рисунок 5.16) и (рисунок 5.17).

Анализ геометрических форм и скоростных характеристик, истекающих из исследуемых гидромониторных насадок струй, показал, что в сравнении с классической насадкой, имеющей круглую форму внутреннего поперечного сечения, гидромониторные насадки с внутренним гексагональным и шестигранным асимметричным поперечным сечением имеют большую зону постоянных скоростей и большие углы расширения струи. К примеру, область постоянных скоростей диффузорной насадки с круглым поперечным сечением составила  $8d_0$  и углом расширения струи  $18^\circ$ , зона постоянных скоростей для гексагональной насадки составила  $9d_0$  и углом расширения уже  $22^\circ$ , а для шестигранной асимметричной аналогичные показатели составили  $11d_0$  и  $30^\circ$  (рисунок 5.16). В данном случае  $d_0$  - усредненный диаметр круга, равного по площади площадям асимметричного и правильного шестигранника выходного сечения соответствующих насадок. При этом подтвердилась ранее выявленная закономерность. Струя, истекающая как из гидромониторной насадки с шестигранным асимметричным, так и гексагональным внутренним поперечным сечением, на выходе из нее также в поперечном сечении имеет форму асимметричного шестиугольника, однако по мере удаления ее от нижнего среза насадки постепенно принимает обычную круглую форму (рисунок 5.18). Это имеет важное практическое значение, так как придание поперечному сечению струи, истекающей из центральной гидромониторной насадки, формы многоугольника дает возможность изначально направлять угловые части струи, имеющих большую тенденцию к их расширению, в направлении межшарошечного пространства, тем самым позволяя очищать зубчатое вооружение основных конусов сразу двух соседних шарошек, что существенно улучшает условия работы зубчатого вооружения [171].

Таким образом, использование фасонных гидромониторных насадок, является перспективным направлением дальнейшего совершенствования промывочных систем ШБИ.

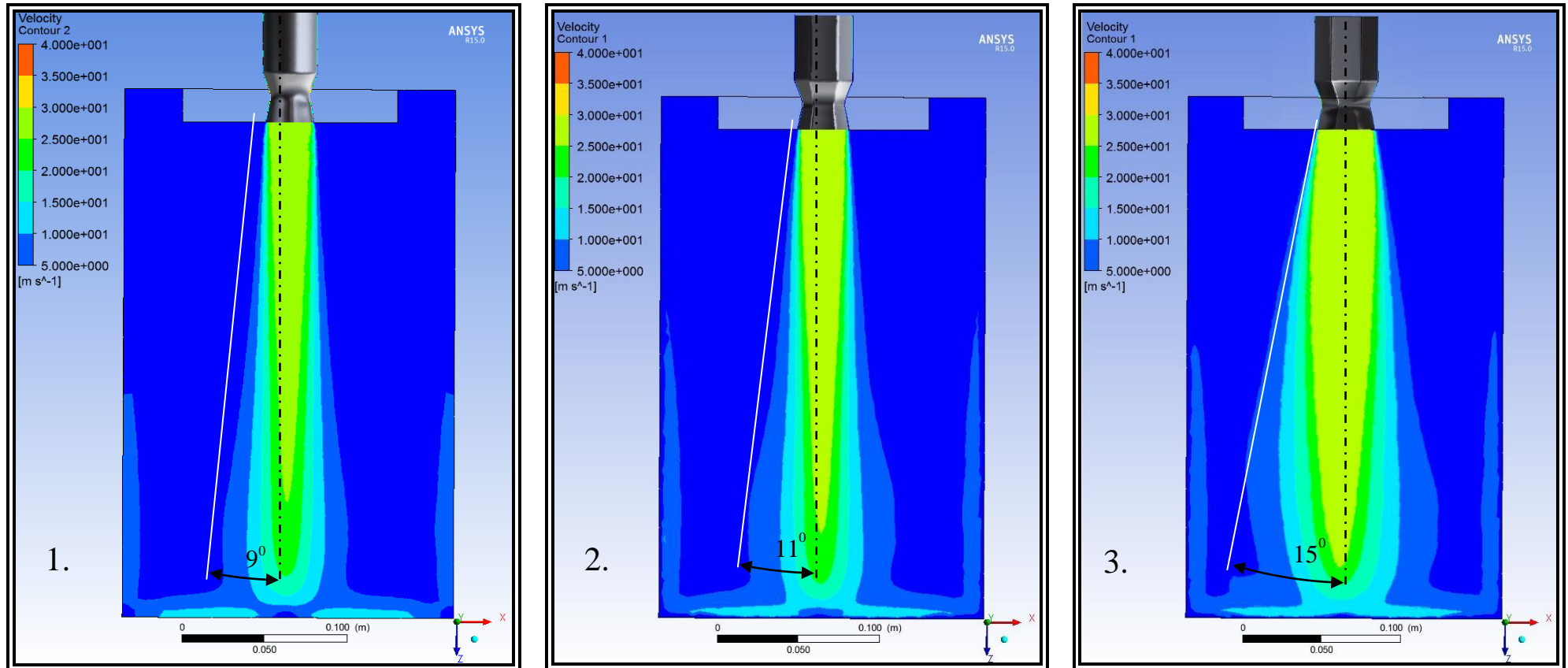


Рисунок 5.16 - Параметры струи для диффузорных гидромониторных насадок с различной формой внутреннего поперечного сечения: 1. круглое; 2. гексагональное; 3. шестигранное асимметричное

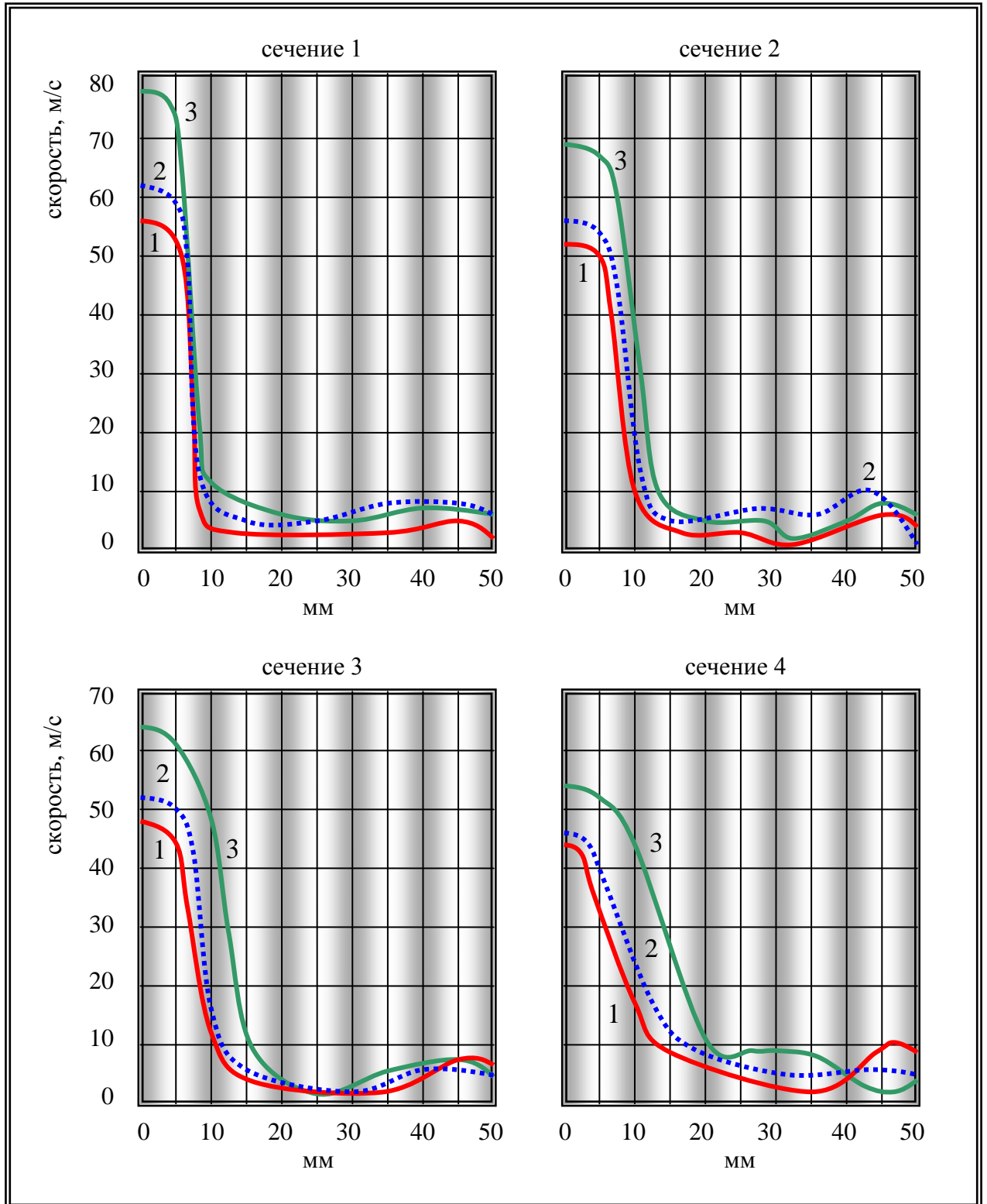


Рисунок 5.17 - Параметры струи в горизонтальных сечениях

1 - для круглой насадки; 2 - для шестигранной насадки;

3 - для шестигранной асимметричной насадки



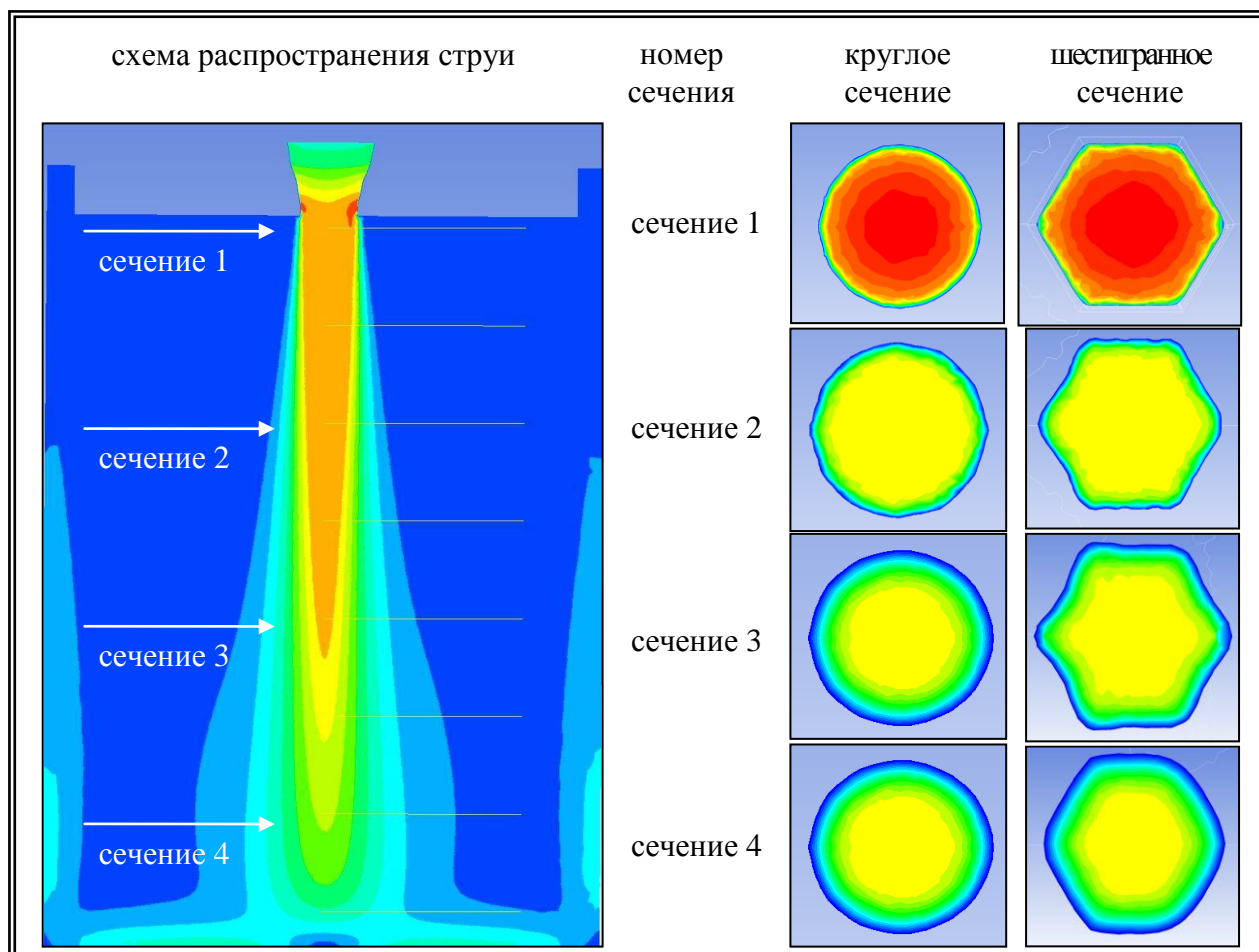


Рисунок 5.18 - Геометрические параметры струи

Для того чтобы реализовать результаты проведенной научно-исследовательской работы, была разработана конструкция трехшарошечного бурового долота с центральной схемой промывки, оснащенная центральной гидромониторной насадкой с внутренним шестигранным асимметричным поперечным сечением (рисунок 5.19). Главной особенностью данной конструкции является выполнение выходной части внутреннего канала гидромониторной насадки в виде диффузора, имеющего шестигранное поперечное сечение, причем каждая вершина многогранника попеременно ориентирована либо в межшарошечное пространство, либо в направлении оси вращения шарошки. При этом многогранное поперечное сечение имеет углы двух размеров и ориентировано так, что каждая вершина с меньшим углом направлена в сторону межшарошечного пространства, а каждая вершина с большим углом - в направлении оси вращения соответствующей шарошки. Чтобы предотвратить проворот насадки и не допустить изменение ее угловой ориентации, она жестко соединена с втулкой и корпусом долота. Конструктивные схемы шарошечного бурового долота и центрального гидромониторного узла представлены на (рисунок 5.19 и 5.20). Буровое долото (рисунок 5.19) состоит из корпуса 1, шарошек 2, зубьев

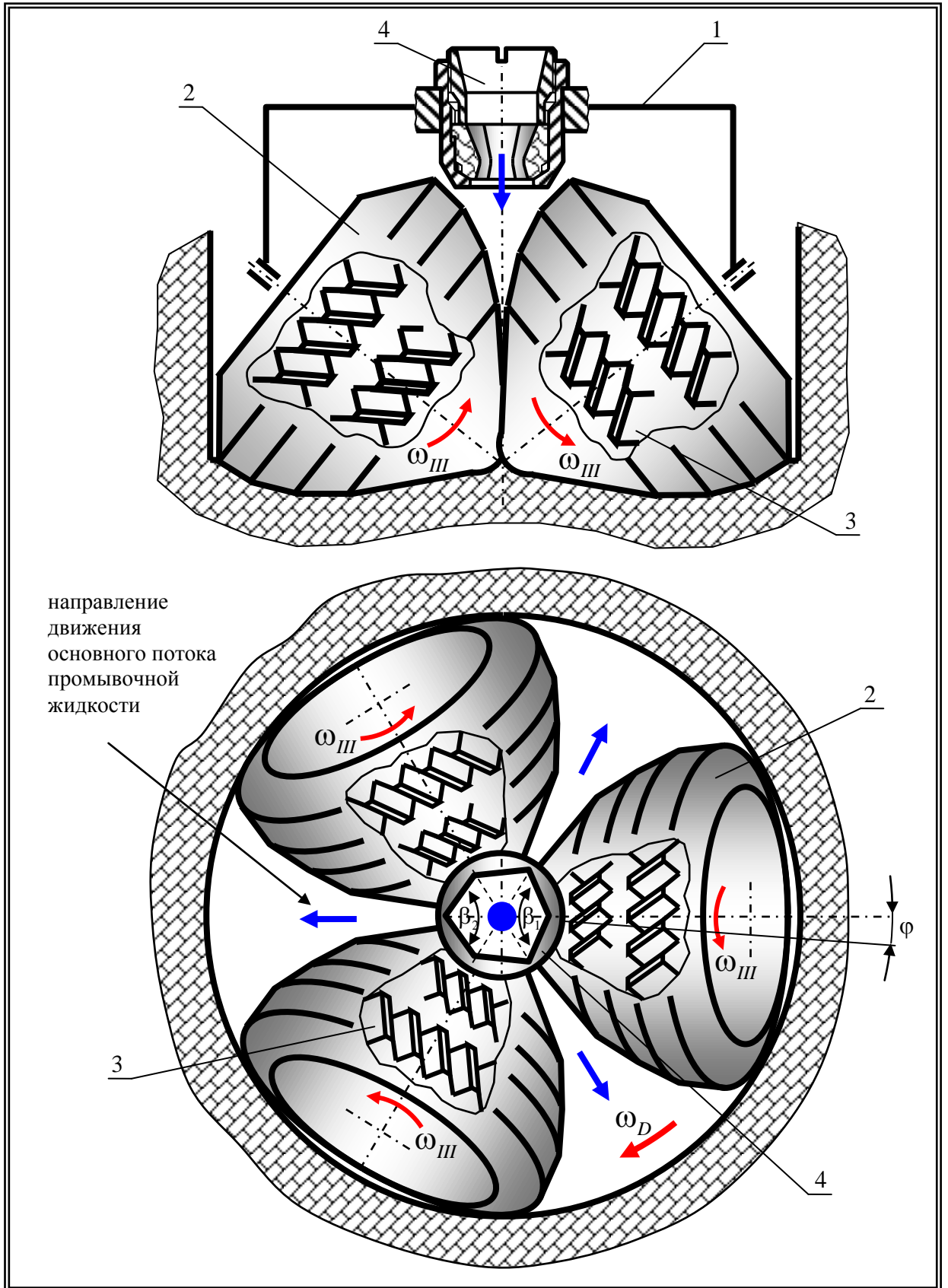


Рисунок 5.19 - Схема шарошечного бурового долота, оснащенного гидромониторным узлом новой конструкции

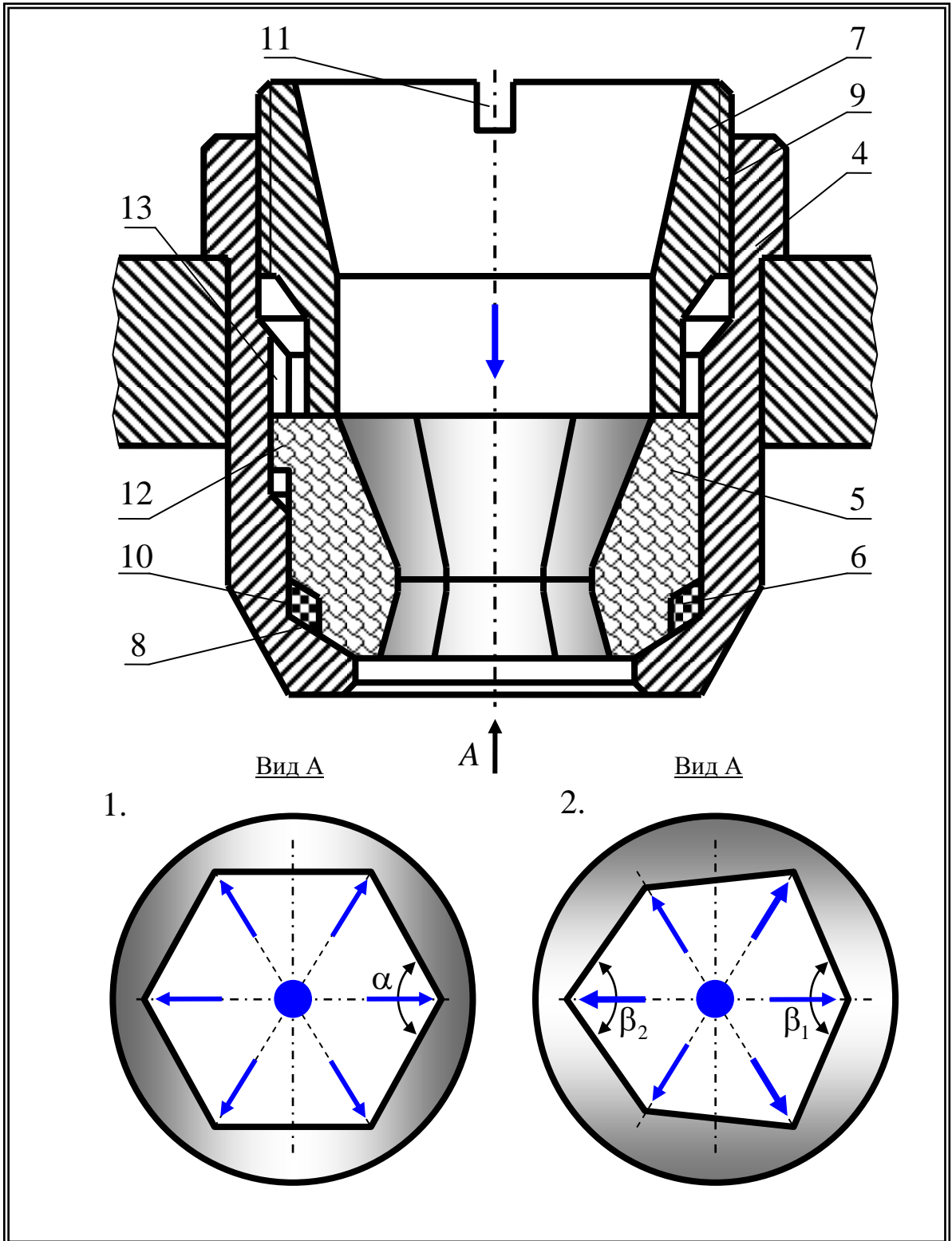


Рисунок 5.20 - Конструктивная схема промывочного узла  
 1 - гексагональное сечение; 2 - шестигранное асимметричное



вооружения 3 и центрального промывочного узла (рисунок 5.20), жестко соединенного с корпусом 1 и состоящего из базирующей втулки 4, внутри которой размещены гидромониторная насадка 5, уплотнительное кольцо 6 и резьбовой ниппель-фиксатор 7. Втулка 4 имеет внутреннюю поверхность ступенчатой формы, на которой предусмотрен опорный уступ 8 под насадку, а также в верхней части имеет резьбу 9 под ниппель-фиксатор 7. Опорная поверхность, выполненная в форме конуса уступа 8, соответствует сопряженной поверхности нижней части насадки 5, которая в свою очередь имеет ступенчатую наружную поверхность, образующую вместе со стенкой втулки 4 и ее уступом 8 паз кольцевой формы 10 для размещения уплотнительного кольца 6. Уплотнительное кольцо 6 прижимается к поверхности упорного уступа 8 торцом нижней части ниппеля-фиксатора 7, который представляет собой резьбовую втулку, соединенную с базирующей втулкой 4, и оснащен пазами 11 под инструмент [55].

Нижняя выходная часть внутреннего канала гидромониторной насадки 5 представляет собой диффузор, имеющий в поперечном сечении многогранник (рисунок 5.19), вершины углов которого направлены строго в сторону межшарошечного пространства и на вооружение основных венцов шарошек 3. С целью предотвращения проворота и сохранения определенной ориентации вершин углов многогранника по отношению к корпусу 1 и шарошкам 3 долота, насадка 5 жестко механически соединена с втулкой 4 (рисунок 5.19). Фиксация насадки 5 по отношению к втулке 4 может обеспечиваться путем изготовления насадки 5 и втулки 4 с выступом 12 и соответствующей ему впадиной 13 [79].

В зависимости от свойств разрушаемых пород, нижняя выходная часть внутреннего канала гидромониторной насадки 5 может выполняться с поперечным сечением как в форме правильного многоугольника с равными углами  $\alpha$  (рисунок 5.20.1), так и асимметричного многоугольника с двумя углами разных размеров  $\beta_1$  и  $\beta_2$  (рисунок 5.20.2). В этом случае вершины углов  $\beta_2$  с меньшим размером, направляются на межшарошечное пространство, в то время как вершины углов  $\beta_1$  с большим размером, направляются вдоль осей шарошек 3 (рисунок 5.19).

Принцип работы инструмента сводится следующему. Под воздействием вертикальной нагрузки и крутящего момента зубчатое вооружение 3 шарошки 2 внедряется в породу и разрушает ее. Разрушенный шлам эвакуируется из призабойной зоны промывочным агентом (жидкостью), нагнетаемым через гидромониторный промывочный узел. За счет того, что выходная часть насадки 4 имеет в поперечном сечении форму многогранника с вершинами углов, направленными вдоль осей шарошек и межшарошечного пространства, а также, за счет использования эффекта «прилипания струи» к боковым поверхностям каналов промывки, создается перепад давлений между периферийной и центральной областями забоя. В свою очередь, перепад давлений создает эжекционный эффект, за счет которого обогащенный шламом промывочный

агент (жидкость) эффективно удаляется из зоны работы инструмента в затрубное пространство, исключая повторное измельчение шлама зубчатым вооружением ШБИ.

Придание внутреннему отверстию гидромониторной насадки диффузорного типа шестигранной формы дает возможность непосредственно направлять отдельные части потока промывочного агента (жидкости), исходящего из насадки 4 (рисунок 5.19), в сторону межшарошечного пространства и зубчатого вооружения вершинных и основных венцов шарошек ШБИ. Для шарошечных долот небольших диаметров возможно использование поперечного сечения в виде правильного многогранника, однако с увеличением диаметральных размеров ШБИ нужно использовать внутреннее поперечное сечение, представляющее собой асимметричный многоугольник, при этом сориентированным следующим образом: большие углы многогранника  $\beta_1$  в направлении осей вращения шарошек 2, меньшие  $\beta_2$  в области межшарошечного пространства. Такая ориентация вершин многоугольника позволяет направлять значительно большее количество потока промывочного агента (жидкости) за счет больших отклонений отдельных его частей в сторону межшарошечного пространства для одновременной и более качественной очистки зубчатого вооружения сразу двух соседних шарошек. При этом для ШБИ с несмещенными осями вращения шарошек в плане, ровно половина углов многоугольника строго направлена вдоль осей шарошек, в то время как для шарошечного инструмента со смещенными шарошками с незначительным поворотом на угол  $\varphi$ , равному развороту шарошек и в том же направлении (рисунок 5.19).

Таким образом, применение разработанной конструктивной схемы ШБИ, оснащенного центральным промывочным гидромониторным узлом новой конструкции, за счет обеспечения более качественной очистке межзубцовых и межвенцовых впадин вооружения основных венцов шарошек, а также всей призабойной зоны в целом даст возможность повысить эффективность работы ШБИ и снизить стоимость проведения буровых работ.

#### **5.4 Разработка конструктивной схемы бокового гидромониторного узла шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением**

Известно, что эффективность разрушения и эвакуации породы при бурении во многом зависит от поля давлений (напряжений), возникающего в зоне забоя. Формируется оно за счет нескольких факторов: механическим воздействием зубьев вооружения инструмента и гидравлическим воздействием потоков промывочной жидкости на забой, а также горным давлением. Важную роль в процессе разбуривания породы забоя и дальнейшем транспортировании её в затрубное пространство и далее на поверхность играет механизм отрыва частиц и перемещения их по забою [43].

Основным условием успешного отрыва и эвакуации частиц разбуриваемой породы в стесненном объеме забоя является обеспечение условия, когда страгивающая составляющая суммарной силы давления на частицу породы всегда больше, чем удерживающая ее сила.

В процессе осуществления буровых работ оказывать влияние на баланс удаляющих и удерживающих сил можно посредством варьирования следующими факторами:

- давлением и скоростью воздействия зубьев вооружения на породу;
- дифференциальным давлением;
- динамическим давлением потока промывочного агента (жидкости) на частицу;
- прижимающей силой давления;
- направлением обтекающей частицу потока;
- силами поверхностного трения и гидродинамического сопротивления, возникающими при перемещении частицы в сторону затрубного пространства.

Рассмотрим, какое влияние повышение динамического давления, создаваемого потоком промывочного агента (жидкости) при прохождении его через гидромониторные узлы ШБИ, оказывает на увеличение механической скорости бурения.

Как правило, увеличение динамического давления осуществляется путем повышения соотношения между подводимой к инструменту гидравлической мощности  $N$  и площадью забоя. Гидравлическую мощность можно определить по формуле [170]

$$N = Q\Delta P_D. \quad (5.16)$$

подставив перепад давления на инструменте  $\Delta P_D$  в формулу (5.16), получим

$$\Delta P_D = \frac{\rho V^2}{2\mu^2}. \quad (5.17)$$

и разделив обе части равенства (5.17) на площадь поверхности забоя  $S_3$ , получаем следующее соотношение:

$$\frac{N}{S_3} = \frac{Q}{S_3} \frac{\rho V^2}{2\mu^2}, \quad (5.18)$$

где

$Q$  – расход промывочного агента (жидкости), м<sup>3</sup>/с;

$V$  – скорость истечения струи из гидромониторной насадки, м/с;

$\rho$  – плотность промывочного агента (жидкости), кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – коэффициент расхода.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что наиболее эффективная очистка забоя осуществляется при определённых значениях множителя  $Q/S_3$  и  $V$ . Рекомендованные скорости истечения  $V = 80 \div 120$  м/с, а удельные расходы  $Q/S_3 = 0,35 \div 0,7$  м<sup>3</sup>/с/м<sup>2</sup>. При этом создаваемый в гидромониторных насадках серийного ШБИ перепад давлений нередко достигает значений  $\Delta P_D = 12 \div 13$  МПа, а в некоторых специальных конструкциях  $\Delta P_D = 30 \div 40$  МПа. Диапазон изменения  $Q/S_3$  в большинстве случаев достаточен, для того чтобы успешно транспортировать шлам на поверхность вдоль затрубного пространства скважины. При определённых значениях  $Q/S_3$  достичь указанных ранее скоростей истечения промывочной жидкости  $V$  можно только за счет использования специальных гидромониторных насадок, приближенных на строго определённое расстояние к поверхности забоя.

Для того чтобы определить вклад струи промывочной жидкости, вносимый ею в общее удаляющее усилие, рассмотрим схему затопленной струи (рисунок 5.21), распространяющейся в цилиндрическом тупике, под углом  $\beta$  по отношению к его центральной оси  $Z$ .

В результате динамического действия струи промывочного агента (жидкости) на забой на его поверхности создаются касательные  $\tau$  (зависимость 2) и нормальные  $\sigma$  (зависимость 1) напряжения. При этом эти напряжения имеют существенную неравномерность их распределения по забою радиуса  $R$ . Для различных расстояний и углов наклона  $\beta$  ( $0 - 90^\circ$ ) осей гидромониторных насадок по отношению к плоскости забоя величины нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$  напряжений никогда не должны превышать максимально допустимого перепада давлений ( $12 \div 13$  МПа) в насадке. Эта величина существенно ниже твердости даже самых мягких пород, однако сравнима с прочностью горных пород на сдвиг.

В связи с этим при формировании удаляющей силы нормальные напряжения, возникающие в породе вследствие торможения струи, вносят существенно меньший вклад в сравнении с касательными напряжениями, создаваемыми движущимися потоками растекающейся струи параллельно поверхности забоя. Особую роль горизонтальные потоки, распространяющиеся вдоль поверхности забоя, играют при эвакуации частиц шлама, уже отделенных от массива зубчатым вооружением ШБИ. Важно добиваться, чтобы при организации движения основных потоков промывочного агента (жидкости) по всей области забоя обеспечивалась беспрепятственная эвакуация шлама из зоны работы инструмента и одновременно не допускалось многократное повторное измельчение выбуренной породы.

При проведении мероприятий, направленных на снижение потери кинетической энергии затопленных струй, исходящих из гидромониторных насадок, большое значение имеют конструктивные особенности бурового инструмента. В связи с этим для каждого типоразмера ШБИ

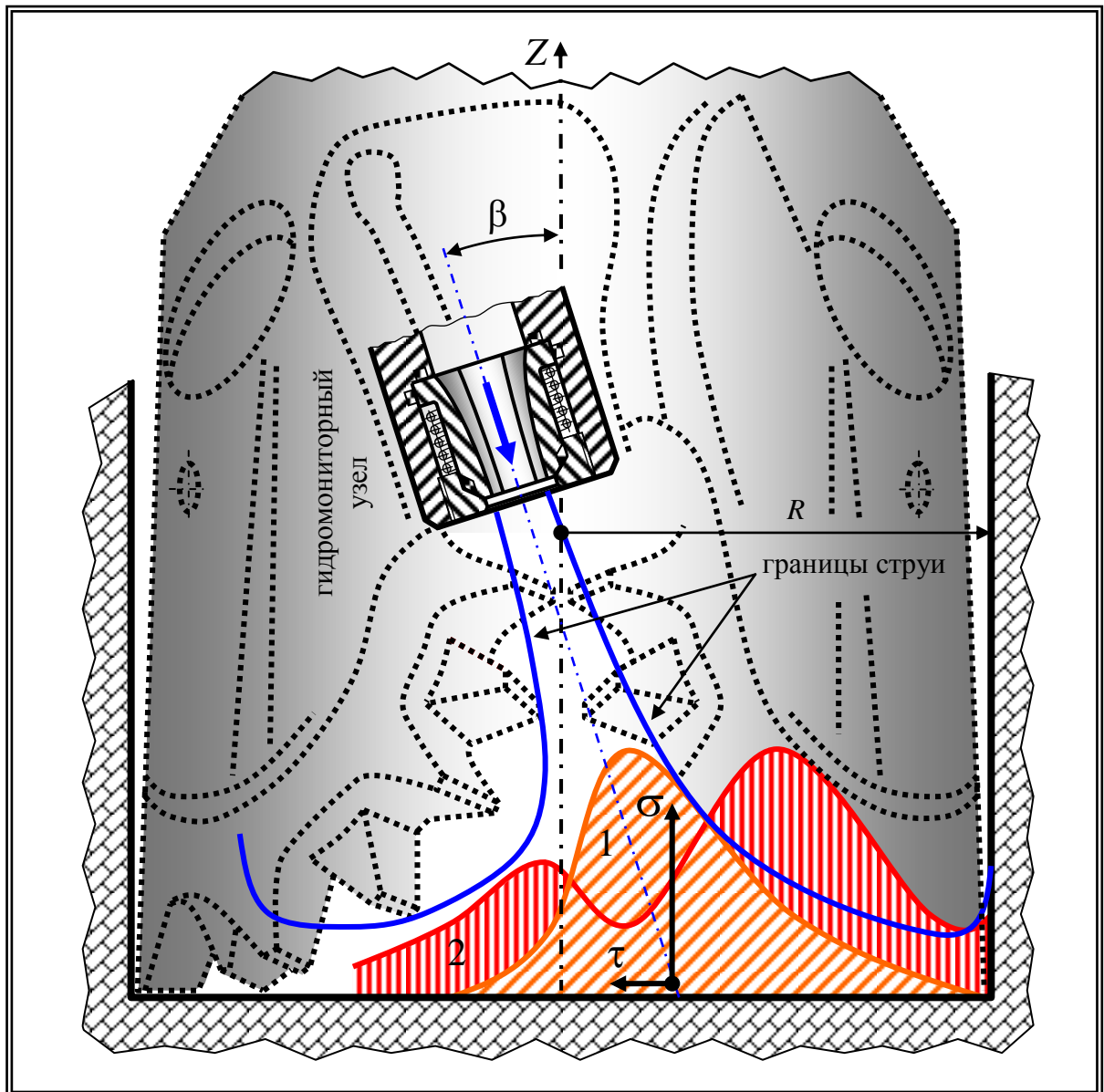


Рисунок 5.21 - Схема затопленной наклонной струи  
в зоне цилиндрического забоя

1 - нормальные напряжения; 2 - касательные напряжения

лучшая схема распространения промывочного агента (жидкости) должна определяться на основе строго индивидуального подхода. Значительной сложностью для организации наиболее рациональных потоков обладает ШБИ больших диаметральных размеров (393,7 и выше), как правило, оснащенный различными комбинированными схемами промывки. При проектировании такого ШБИ особо важное значение имеют такие параметры их конструкций, как геометрические особенности корпуса инструмента, геометрические характеристики зубчатого вооружения шарошек и их собственная геометрия и расположение относительно оси ШБИ, а также величина расстояния от выходных частей гидромониторных узлов до забоя. Совокупность этих параметров должна увеличивать касательные составляющие напряжений в распространяемых в призабойной зоне потоках промывочного агента (жидкости).

Удаление шлама с поверхности забоя происходит за счет истекающих из гидромониторных насадок шарошечного бурового инструмента турбулентных струй промывочной жидкости.

Известно, что осевая скорость турбулентной струи меняется обратно пропорционально расстоянию от воображаемого полюса струи «0» (рисунок 5.22), а увеличение расхода происходит прямо пропорционально этому же расстоянию.

Динамическое давление по оси струи определяется следующим образом:

$$\text{для } l < l_0: P = \rho \frac{V_0^2}{2}; \quad (5.19)$$

$$\text{для } l > l_0: P = \rho \frac{V_m^2}{2} = \left( \frac{1 + am_0}{1 + am} \right) P_0 = \lambda^2 P_0, \quad (5.20)$$

где  $a$  – коэффициент, учитывающий расширение струи промывочной жидкости;  $m_0$  – расстояние (относительное) от гидромониторной насадки;  $m$  – относительная длина зоны постоянных скоростей струи;  $\lambda^2$  коэффициент уменьшения динамического давления.

Таким образом, в центральной части струи динамическое давление практически постоянно при  $l > l_0$ , но потом существенно уменьшается.

Работа насадок с эллиптическим профилем сопровождается уменьшением динамического давления на расстоянии в  $10d_0$  на 50 %, а с прямым входом до 20 % от первоначального значения. На расстоянии  $(20 \div 25)d_0$  динамическое давление практически обнуляется (рисунок 5.23). Также существенное влияние профиль насадки оказывает на величину зоны постоянных скоростей и угол расширения струи. Если насадки с прямым входом имеют коэффициент скорости  $\varphi = 0,6$ , то с эллиптическим профилем уже  $\varphi = 0,99$ , что свидетельствует о том, что практически вся энергия перепада давления на инструменте переходит в кинетическую энергию промывочной жидкости.

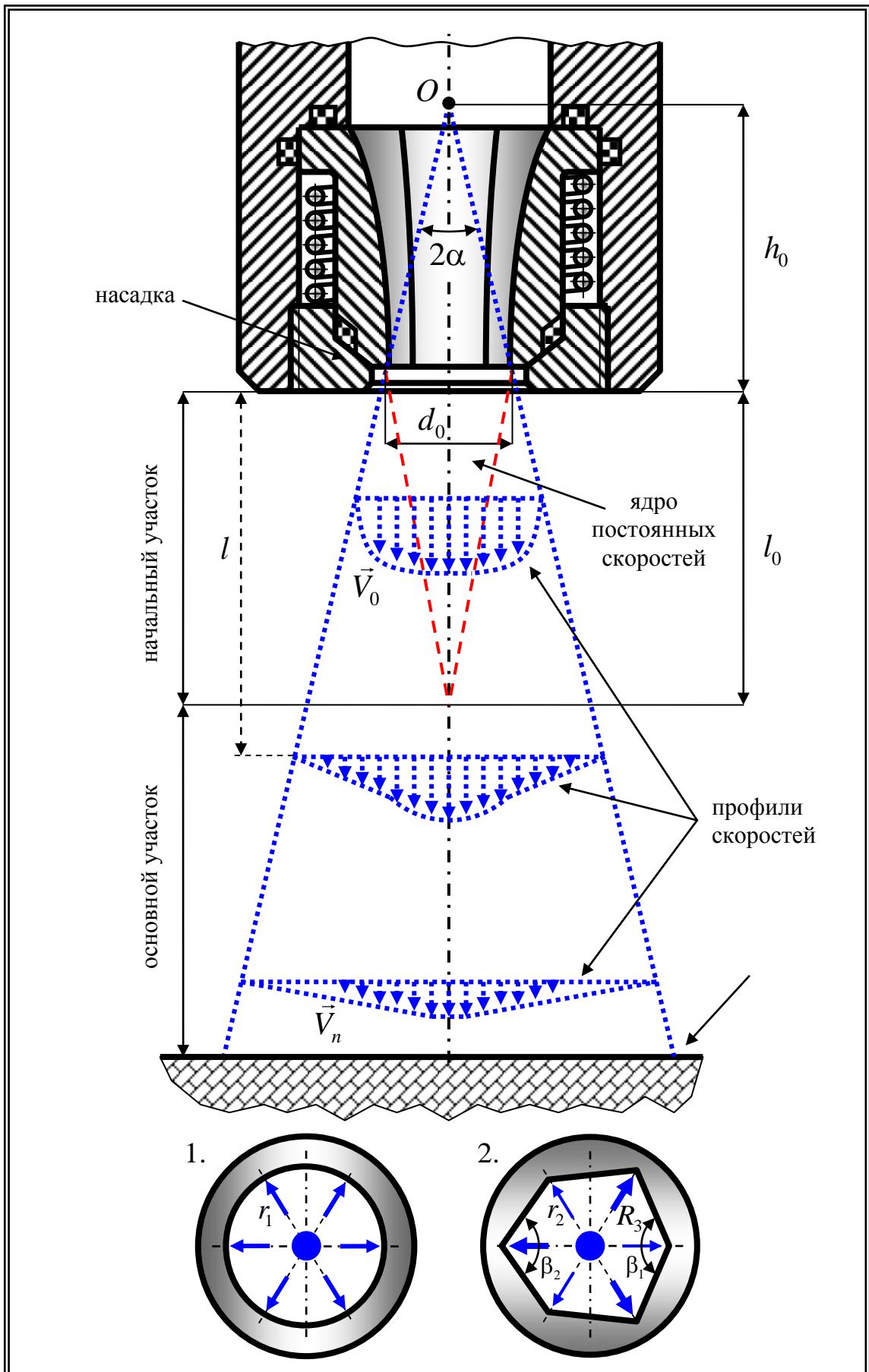


Рисунок 5.22 – Схема затопленной вертикальной струи из гидромониторной насадки  
 1 - с круглым сечением; 2 – с шестигранным асимметричным сечением

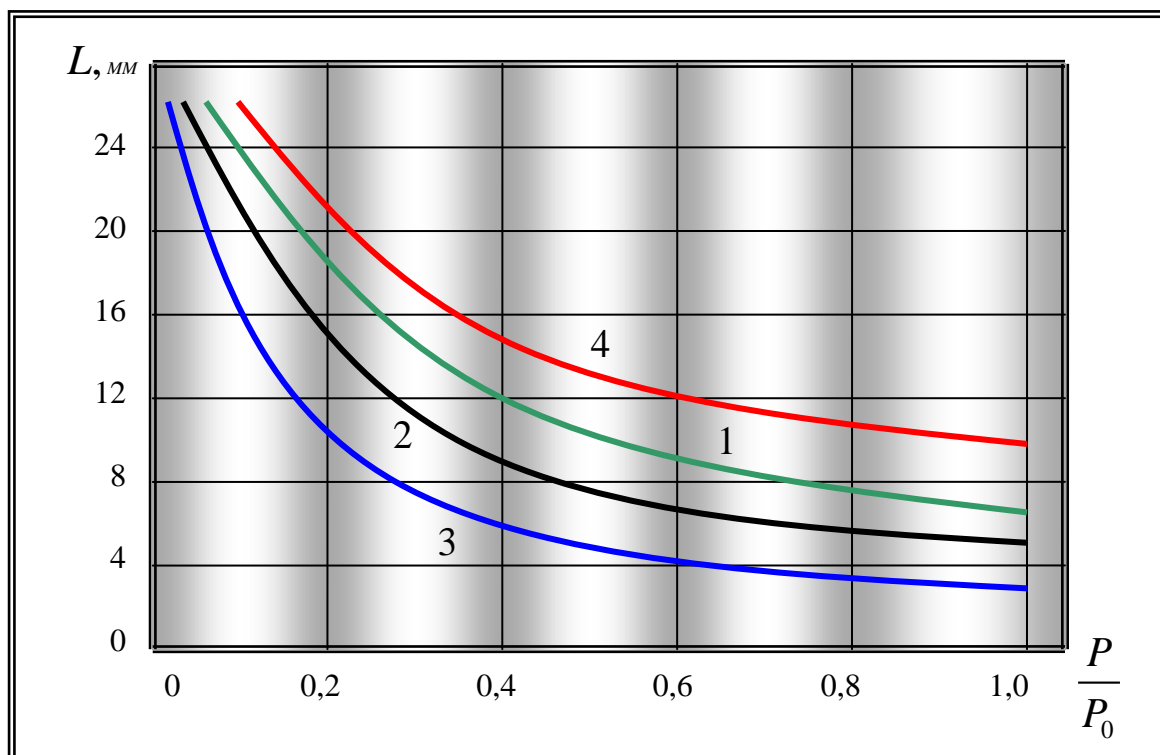


Рисунок 5.23 - Зависимость динамического давления в средней части струи от ее удаления от среза гидромониторной насадки, с входом:

1 – эллиптическим; 2 – коническим; 3 – цилиндрическим; 4. - коноидальным

Существует два основных способа оценки скорости струи на забое - из уравнения Бернулли и уравнения импульсов. Согласно уравнению Бернулли [170], скорость струи на забое  $V_3$  определяется как

$$V_3 = \sqrt{V_H^2 + 2gl + 2 \frac{P_H - P_3}{\rho} - 2gh_{H3}}, \quad (5.21)$$

где

$P_H$  – давление на срезе гидромониторной насадки, Па;

$V_H$  – скорость струи промывочного агента (жидкости) на выходе из насадки, м/с;

$\rho$  – плотность промывочной жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$P_3$  – давление на забое, Па;

$l$  – удаленность насадки от поверхности забоя, м;

$h_{H3}$  – потери энергии в затопленной струе, Дж.

Представим давление на поверхности кольцевого забоя  $P_3$  как гидростатическое:

$$P_3 = \rho gz, \quad (5.22)$$

где  $z$  – глубина скважины по вертикали, м.



Величину давления  $P_H$  на срезе гидромониторной насадки, возможно определить по давлению на стояке разбуриваемой скважины  $P_C$ , а длину зоны постоянных скоростей  $l_0$  струи рассчитать по формуле

$$l_0 = \frac{d_1}{2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (5.23)$$

где  $\alpha$  – угол раствора струи, град.;  $d_1$  – внутренний диаметр отверстия на срезе насадки, м.

При удаленности среза насадки от поверхности забоя на величину, меньшую, чем зона постоянных скоростей струи, скорость соударения струи с поверхностью забоя можно считать равной скорости на срезе гидромониторной насадки.

Для того чтобы определить, какое влияние геометрия внутреннего поперечного сечения гидромониторной насадки конфузорного типа оказывает на основные характеристики струи, при помощи программного модуля Ansys были построены модели двух гидромониторных насадок конфузорного типа: с круглым (рисунок 5.24.1) и асимметричным шестиугольным (рисунок 5.24.2) внутренними поперечными сечениями. Одной из особенностей построения данных моделей является то, что площади одноименных сечений внутренних отверстий каждой из насадок имеют одинаковые величины [122]:

$$S_K = S_{A6}; \quad (5.24)$$

$$\pi r_1^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} r_2 R_3; \quad (5.25)$$

$$\pi r_1^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} R_2^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} r_3 R_3, \quad (5.15)$$

где

$S_K$  – площадь внутреннего круглого сечения насадки, мм<sup>2</sup>;

$S_{A6}$  – площадь внутреннего асимметричного шестигранного сечения насадки, мм<sup>2</sup>;

$r$  – радиус внутреннего круглого сечения насадки, мм;

$R_3$  и  $r_2$  – радиусы окружностей, описанных вокруг вершин острых и тупых углов внутреннего шестигранного асимметричного сечения насадки, мм.

Проведение CFD расчёта осуществлялось на базе программного комплекса ANSYS Fluent [128]. Поэтому для описанных выше геометрий потребовалось создание сеточных моделей двух типов насадок конфузорного типа (рисунок 5.24).

В результате проведенных расчетов были выявлены картины истечения промывочного агента (жидкости) из двух типов конфузорных насадок, с круглым и шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением, а также поля распределения и величины параметров в интересующих зонах потока (рисунок 5.25).

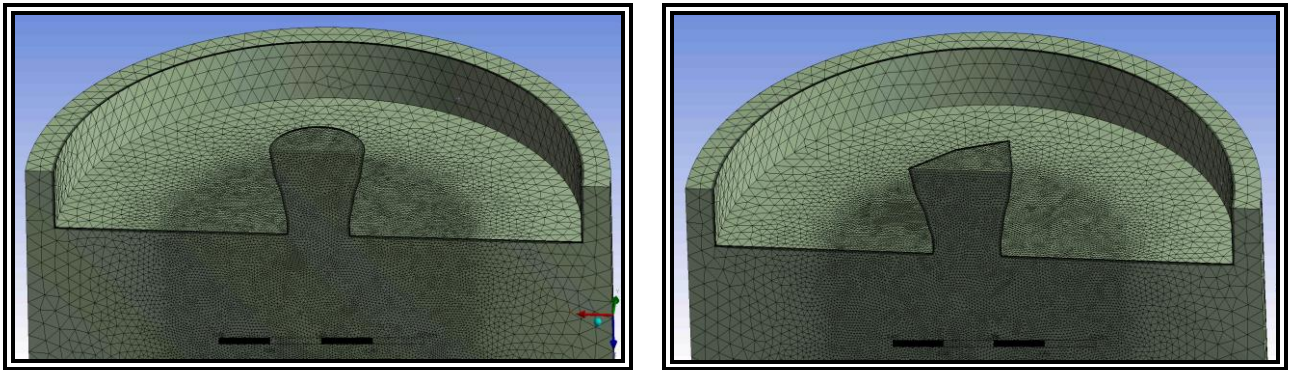


Рисунок 5.24 - Конечно-элементные сетки расчетных моделей конфузорных гидромониторных насадок с различной формой внутреннего поперечного сечения:

1. круглое; 2. шестигранное асимметричное

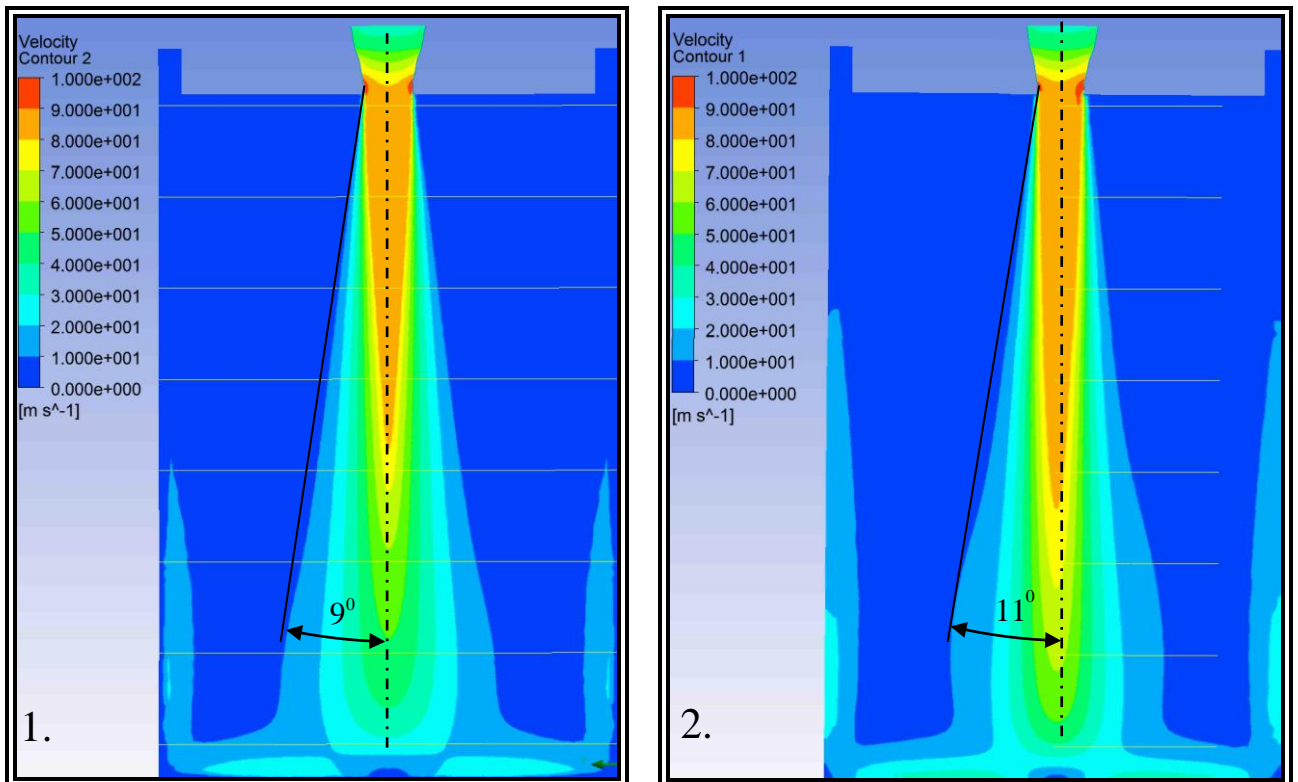


Рисунок 5.25 - Параметры струи для конфузорных гидромониторных насадок с различной формой внутреннего поперечного сечения:

1. круглое; 2. шестигранное асимметричное

Анализ геометрических форм и скоростных характеристик, истекающих из исследуемых гидромониторных насадок струй, показал, что в сравнении с классической насадкой, имеющей круглую форму внутреннего поперечного сечения, гидромониторные насадки с внутренним шестигранным асимметричным поперечным сечением имеют большую зону постоянных скоростей, и большие углы расширения струи. К примеру, область постоянных скоростей конфузорной насадки с круглым поперечным сечением составила  $10d_0$  и углом расширения струи  $18^\circ$ , а для шестигранной асимметричной аналогичные показатели составили  $14d_0$  и  $22^\circ$  (рисунок 5.25). Это еще раз подтверждает полученные ранее результаты, свидетельствующие о том, что геометрия поперечного сечения насадки серьезно влияет на эффективность ее работы. Как и в случае с диффузорными насадками, струя, истекающая из гидромониторной конфузорной насадки с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением, на выходе также в поперечном сечении имеет форму асимметричного шестиугольника, однако по мере удаления ее от нижнего среза насадки постепенно принимает обычную круглую форму

Для того чтобы реализовать результаты проведенной научно-исследовательской работы, была разработана конструкция трехшарошечного бурового долота с боковой симметричной схемой промывки, оснащенная гидромониторными насадками с внутренним шестигранным асимметричным поперечным сечением (рисунок 5.26). Главной особенностью данной конструкции является выполнение выходных частей внутренних каналов гидромониторных насадок в виде диффузора, имеющего шестигранное поперечное сечение. При этом многогранное поперечное сечение имеет углы двух размеров и ориентировано так, что две вершины из трех с меньшими углами направлены в стороны зон контактирования периферийных венцов набегающей и сбегаящей шарошек со стенкой скважины, а одна оставшаяся вершина с меньшим углом - в направлении оси вращения ШБИ. Чтобы предотвратить проворот насадок и не допустить изменение их угловых ориентаций, они жестко соединены с втулками и корпусом долота. Конструктивные схемы шарошечного бурового долота и его промывочных узлов показаны на (рисунок 5.22) и (рисунок 5.26). Буровое долото состоит из корпуса 1, шарошек 2, зубьев 3 и гидромониторных боковых узлов с гидромониторными насадками 4, которые жестко зафиксированы каким либо способом от проворота в корпусе 1 [80, 140]. Выходные части внутренних каналов 5 гидромониторных насадок 4 выполнены в виде диффузоров, имеющих шестигранное поперечное сечение. При этом многогранное поперечное сечение имеет углы двух размеров  $\beta_1$  и  $\beta_2$  и ориентировано так, что две вершины из трех с меньшими углами  $\beta_2$  направлены в стороны периферийных венцов набегающей и сбегаящей шарошек, а одна оставшаяся вершина с меньшим углом  $\beta_2$  - в направлении оси вращения ШБИ.

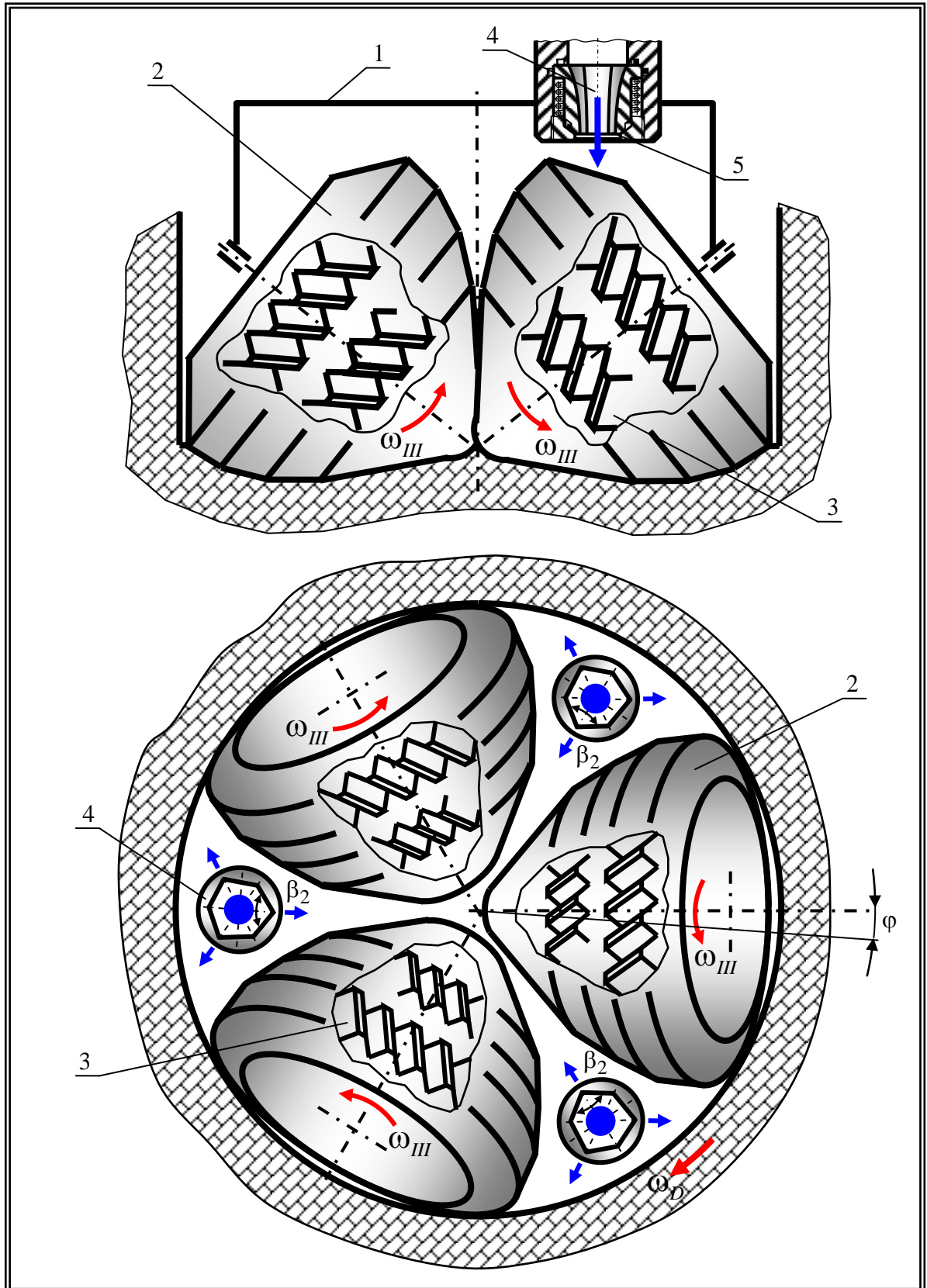


Рисунок 5.26 - Схема шарошечного бурового долота, оснащенного боковыми гидромониторными узлами новой конструкции

Принцип работы инструмента сводится следующему. Под воздействием вертикальной нагрузки и крутящего момента зубчатое вооружение 3 шарошки 2 внедряется в породу и разрушает ее. Разрушенный шлам эвакуируется из призабойной зоны промывочным агентом (жидкостью), нагнетаемым через гидромониторные промывочные узлы. За счет того, что выходные части насадок 4 имеют в поперечном сечении форму многогранника, с вершинами углов, направленными в стороны зон контактирования периферийных венцов набегающей и сбегающей шарошек со стенкой скважины и в направлении оси вращения ШБИ, а также за счет использования эффекта «прилипания струи» к боковым поверхностям каналов промывки, создается перепад давлений между периферийной и центральной областями забоя. В свою очередь, перепад давлений создает эжекционный эффект, за счет которого обогащенный шламом промывочный агент (жидкость) эффективно удаляется из зоны работы инструмента в затрубное пространство, исключая повторное измельчение шлама зубчатым вооружением ШБИ.

Придание внутренним отверстиям гидромониторных насадок конфузторного типа шестигранной формы дает возможность непосредственно направлять отдельные части потока промывочного агента (жидкости), исходящего из насадки 4 (рисунок 5.26), в направлении оси вращения ШБИ и в зоны работы периферийных венцов набегающей и сбегающей шарошек. Для шарошечных долот небольших диаметров возможно использование поперечного сечения в виде правильного многогранника, однако с увеличением диаметральных размеров ШБИ нужно использовать внутреннее поперечное сечение, представляющее собой асимметричный многоугольник. При этом он должен быть сориентирован следующим образом: большие углы многогранника  $\beta_1$  в направлении зубчатого вооружения основных конусов шарошек 2 и стенки скважины, а меньшие  $\beta_2$  так, чтобы две вершины из трех были направлены в стороны зон контактирования периферийных венцов набегающей и сбегающей шарошек со стенкой скважины, а одна оставшаяся вершина с меньшим углом - в направлении оси вращения ШБИ. Такая ориентация вершин многоугольника позволяет направлять значительно большее количество потока промывочного агента (жидкости) в сторону межшарошечного пространства для одновременной и более качественной очистки зубчатого вооружения сразу двух соседних шарошек, а также очищать наиболее нагруженные периферийные венцы шарошек и облегчать процесс эвакуации шлама с периферии забоя в затрубное пространство [80].

Таким образом, применение разработанной конструктивной схемы ШБИ с гидромониторными насадками новой конструкции и боковой симметричной схемой промывки, за счет обеспечения более качественной очистки межзубцовых и межвенцовых впадин вооружения основных и периферийных венцов шарошек, а также всей призабойной зоны в целом даст возможность повысить эффективность работы ШБИ и снизить стоимость буровых работ.

### 5.5 Исследование гидродинамических процессов, происходящих при работе косозубого вооружения

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования гидродинамических процессов, происходящих при различных схемах промывки ШБИ, с достаточной точностью и полнотой отражают картину, характеризующую распределение давлений и скоростных потоков промывочного агента (жидкости) в околозабойной зоне и вдоль стенок скважины в процессе ее бурения. Однако, на сегодняшний день, практически не существует исследований, связанных с определением влияния геометрических параметров зубчатого вооружения шарошек ШБИ на гидравлическую среду призабойной зоны.

С целью изучения этого влияния были проведены предварительные лабораторные испытания. Суть их заключалась в следующем. На станину вертикально-фрезерного станка «БР12» устанавливалась емкость с жидкостью (рисунок 5.27). В пиноли станка закреплялась торцевая фреза диаметром 42 мм и углом наклона винтовой линии боковых поверхностей зубьев 20 градусов. Фреза опускалась в емкость с жидкостью с таким расчетом, чтобы заглубление торца фрезы составляло порядка 10 мм. При включении станка шпиндель с закрепленной в пиноли торцевой фрезой начинал вращаться. Скорость вращения шпинделя варьировалась от 300 до 600 об/мин., что практически соответствует линейным скоростям зубьев (относительно оси вращения шарошки) вооружения периферийных рядов шарошек буровых долот диаметром 295,3 мм при вращении шарошечного инструмента с оборотами 40-150 об/мин, т. е. низкооборотном роторном бурении.

Все происходящее фиксировалось путем видеосъемки, которая в дальнейшем подвергалась раскадрированию. Результаты представлены на (рисунок 5.27). Как видно из стоп-кадров при резком разгоне инструмента, боковые винтовые поверхности зубьев фрезы поднимают жидкость вверх на 20-25 мм, т. е. на расстояние в 2-2,5 раза большее, нежели первоначальное заглубление инструмента [152].

При частоте вращения инструмента 300 об/мин подъем жидкости происходил на примерно вдвое меньшую величину, чем при 600 об/мин. Провести эксперимент на скоростях, превышающих 1000 об/мин. не удалось, так как подъем и разбрызгивание жидкости были настолько сильными, что зафиксировать их с применением имеющихся технических средств видео фиксации не представлялось возможным. Если вычислить необходимую скорость вращения фрезы, которая бы эмитировала работу периферийного венца шарошки долота диаметром 295,3 при работе от турбобура с частотой вращения 600 об/мин, то ее скорость должна была быть порядка 2800 об/мин.

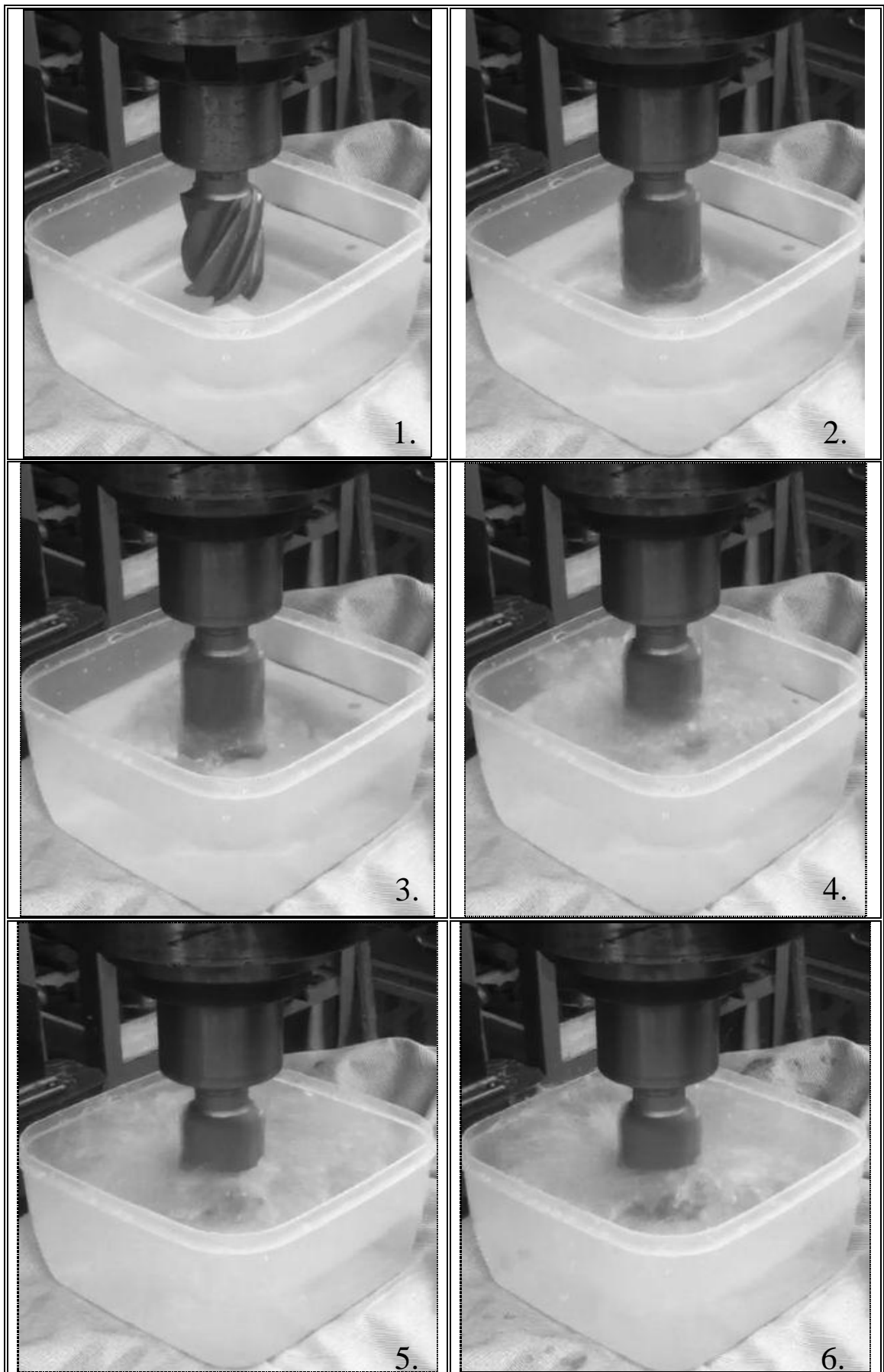


Рисунок 5.27 – Стоп-кадры видео фиксации работы инструмента

1 – 0 об/мин; 2 – 50 об/мин; 3 – 150 об/мин; 4 – 300 об/мин; 5 – 450 об/мин; 6 – 600 об/мин

Таким образом, проведенные лабораторные испытания свидетельствуют о том, что косозубое вооружение обладает значительным потенциалом с точки зрения его воздействия на гидравлическую среду забоя и чем больше скорость вращения инструмента, тем больше это воздействие.

С целью дальнейшего исследования возможности КЗВ оказывать влияние на величину и направление проходящего сквозь него потока промывочного агента (жидкости) были созданы 3D-модели периферийных венцов шарошек бурового инструмента с прямозубым и косозубым вооружением (рисунок 5.30 – 5.33).

При решении этой задачи был использован программный специализированный комплекс Ansys Fluent. Данный математический CFD пакет широко используется при решении различных гидрогазодинамических задач и базируется на решении различными методами уравнения Навье - Стокса. В каждом конкретном случае метод решения напрямую зависит от выбранной модели турбулентности. В нашем случае используется SST k-omega модель турбулентности [115].

Уравнения Навье - Стокса для установившегося течения несжимаемой и вязкой жидкости имеют следующий вид:

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} = 0; \quad (5.26)$$

$$\rho \left( u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} \right) = -\frac{dp}{dx} + \mu \left( \frac{d^2u}{dx^2} + \frac{d^2u}{dy^2} \right); \quad (5.27)$$

$$\rho \left( u \frac{dv}{dx} + v \frac{dv}{dy} \right) = -\frac{dp}{dy} + \mu \left( \frac{d^2v}{dx^2} + \frac{d^2v}{dy^2} \right). \quad (5.28)$$

Рассмотрим решения, имеющие только одну компоненту скорости  $u(x, y)$ , а  $v(x, y) \equiv 0$ . Тогда первое уравнение преобразится в  $u = u(y)$ , а третье  $-p = p(x)$ . При этом второе уравнение сведется к

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{d^2u}{dy^2}. \quad (5.29)$$

Поскольку левая часть в этом равенстве зависит только от  $x$ , а правая – только от  $y$ , то единственная возможность удовлетворить ему - сделать обе части константами:

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{d^2u}{dy^2} = -i \equiv const. \quad (5.30)$$

Величина  $i$  представляет собой градиент давления, под действием которого происходит движение жидкости. Если движение происходит слева направо, давление в течении падает и  $i > 0$ . При этом распределение скорости всегда параболическое:



$$u = \frac{i}{2\mu} y^2 + c_1 y + c_2. \quad (5.31)$$

Постоянные  $c_1, c_2$  определяются из граничных условий

Суть модели турбулентности SST  $k$ - $\omega$ , заключается в том, что уравнение движения преобразуется к виду, где учитывается влияние флуктуации средней скорости (кинетической турбулентной энергии) и процесса снижения данной флуктуации за счёт вязкости (скорости диссипации турбулентной энергии). В процессе использования этой модели осуществляется решение двух дополнительных уравнений, транспорта диссипации турбулентности и кинетической энергии турбулентности.

Стандартная « $k - \omega$ » (турбулентная кинетическая энергия - удельная скорость диссипации) модель, базируется на теории Вилкокса [24]. Данная модель турбулентности для CFD, учитывающая сжимаемость жидкости и сдвиговые перемещения, достаточно достоверна для низких чисел Рейнольдса. Слабым местом модели Вилкокса, является сильная зависимость решения (набегающая чувствительность) от значений  $k$  и  $\omega$  за пределами слоя сдвига. В Ansys Fluent была снижена данная зависимость, но все равно возникают при моделировании свободно сдвиговых течений.

Турбулентная кинетическая энергия  $k$  и удельная скорость диссипации (рассеяния)  $\omega$  определяются из представленных ниже уравнений передачи энергии:

$$\frac{d}{dt}(pk) + \frac{d}{dx_i}(pk u_i) = \frac{d}{dx_j} \left( T_k \frac{dk}{dx_j} \right) + G_k - Y_k + S_k; \quad (5.32)$$

и

$$\frac{d}{dt}(p\omega) + \frac{d}{dx_i}(p\omega u_i) = \frac{d}{dx_j} \left( T_\omega \frac{d\omega}{dx_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega. \quad (5.33)$$

В данном уравнении  $G_k$  представляет собой значение кинетической энергии турбулентности различных градиентов скорости.  $G_\omega$  - генерацию  $\omega$ .  $T_k$  и  $T_\omega$  представляют собой эффективный коэффициент диффузии  $k$  и  $\omega$ , соответственно.  $Y_k$  и  $Y_\omega$  представляют из себя рассеяние  $k$  и  $\omega$  в форме турбулентности. Абсолютно все перечисленные выше переменные определяются путем расчетов, описанных ниже.  $S_k$  и  $S_\omega$  определяемые пользователем источники.

В процессе исследований применялась неньютоновская жидкость с заданным законом Non-Newtonian-Power-Law изменения вязкости среды. Для несжимаемой ньютоновской жидкости напряжения сдвига пропорциональны скорости изменения деформаций тензора  $\bar{D}$

$$\bar{r} = \mu \bar{D}, \quad (5.34)$$

где

$\bar{D}$  определяется по

$$\bar{D} = \left( \frac{du_j}{dx_i} + \frac{du_i}{dx_j} \right). \quad (5.35)$$

и  $\mu$  - вязкость, не зависящая от  $\bar{D}$ .

При этом для отдельных неньютоновских жидкостей напряжения сдвига тоже возможно записать в терминах неньютоновской вязкости  $\eta$ :

$$\bar{r} = \eta(\bar{D})\bar{D}. \quad (5.36)$$

Как правило,  $\eta$  - это функция всех инвариантов скорости изменения тензора деформации  $\bar{D}$ . Тем не менее, в неньютоновской модели доступной в Ansys Fluent,  $\eta$  считается функцией скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  и связана со вторым инвариантом  $\bar{D}$  как

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}\bar{D}:\bar{D}}. \quad (5.37)$$

Если выбрать закон изменения вязкости среды, то неньютоновская модель будет моделироваться как степенной закон для THENON - ньютоновской вязкости

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1}H(T), \quad (5.38)$$

где

$m$  и  $n$  параметры на входе;

$m$  - является мерой усредненной вязкости жидкости (индекс последовательности);

$n$  - является мерой отклонения жидкости из ньютоновской (индекс степенной).

Значение  $n$  определяет класс жидкости:

$n = 1$  - ньютоновская жидкость;

$n > 1$  - сдвига утолщение (дилатентных жидкостей);

$n < 1$  - сдвига разжижающие (псевдопластик).

Все модели являются циклическими и симметричными, поэтому для расчёта использовались секции зубчатых венцов (рисунок 5.30) с заданием условия симметрии (рисунок 5.28).

Вращение венцов моделировалось при следующих частотах: 300 об/мин и 600 об/мин. В качестве гидравлической среды была использована промысловая неньютоновская жидкость, обладающая плотностью 2200 кг/м<sup>3</sup>. При этом изначальная скорость потока составляла 0,1 м/с.

Для решения данной CFD задачи была произведена параметризация в расчётной среде Workbench, представленной на (рисунок 5.29).

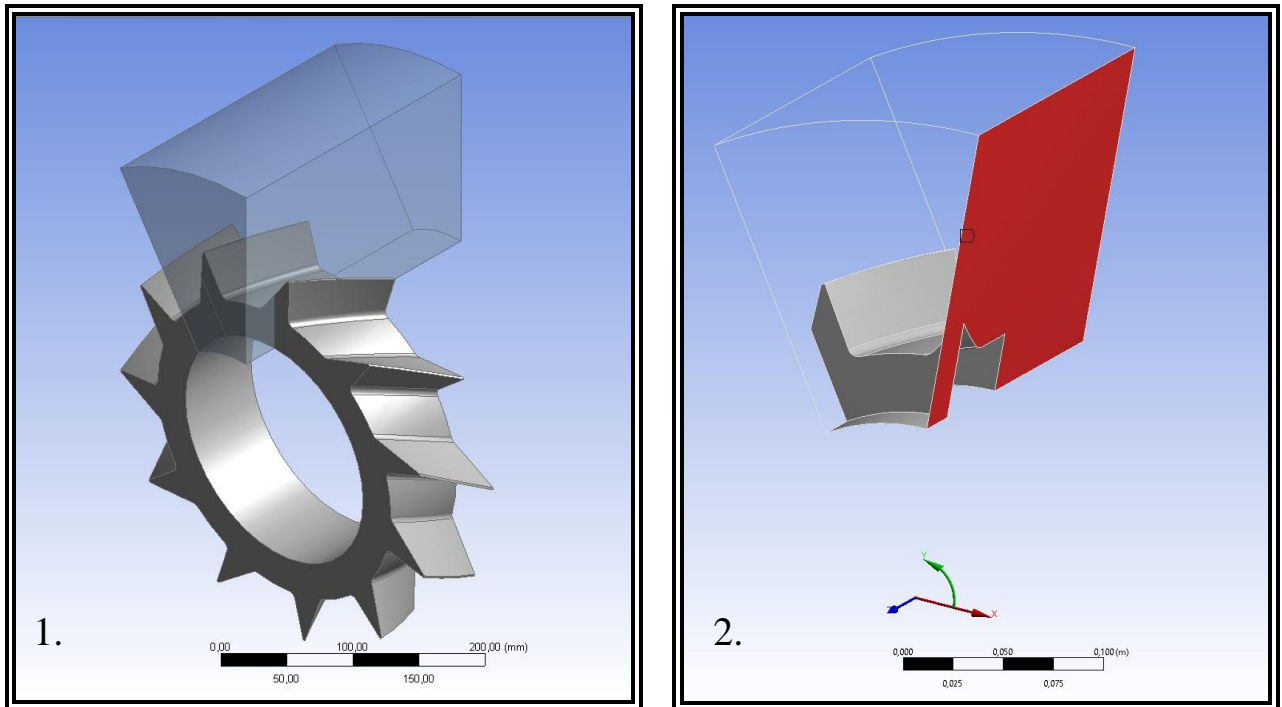


Рисунок 5.28 - Модель венца вооружения шарошечного бурового инструмента

1 - геометрия расчётной зоны; 2 - условие симметрии модели

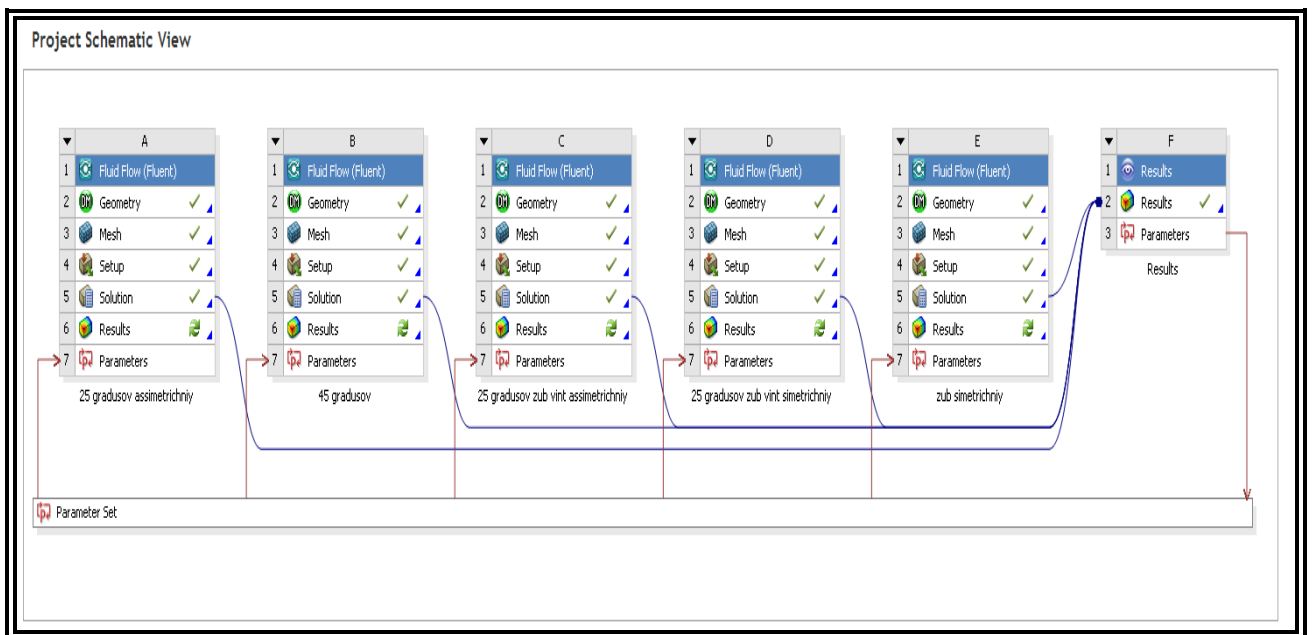


Рисунок 5.29 - Схема проекта в среде Workbench

На (рисунок 5.30 - 5.33) представлены гидродинамические модели течения промывочной жидкости сквозь прямозубое и косозубое вооружение, вращающихся венцов различных конструкций. Для систематизации вооружения были приняты следующие условные обозначения. Венцы с обычным шагом зубчатого вооружения получили маркировку «С», т. е. вооружение для бурения средних пород. Венцы с увеличенным шагом зубьев получили маркировку «М», т. е. вооружение для бурения мягких пород. При этом высота и угол заострения зубьев всех венцов, с целью корректности экспериментов, были выбраны одинаковыми.

На (рисунок 5.33) в графическом формате представлены результаты расчетов скоростей промывочной жидкости вдоль межзубного пространства для различных гидродинамических моделей вооружения.

Как видно из графического материала, для всех видов зубчатого вооружения венца шарошки характерна важная особенность, заключающаяся в резком увеличении скорости потока при вхождении его в область действия зубьев вооружения, с последующим постепенным равномерным уменьшением в течение всего времени прохождения пространства между зубьями вооружения и значительным падением, в зоне выхода из области воздействия зубьев. При этом повышение скорости течения потока косозубым вооружением в несколько раз выше, чем прямозубым, а прирост скорости промывочного агента (жидкости) при прохождении всех типов зубчатого вооружения существенно зависит от скорости вращения зубчатых венцов. Чем выше частота вращения венцов, тем существенней прирост скорости движения жидкости.

Однако имеются и существенные отличия в работе различных типов вооружения. Так, например, для прямозубого вооружения и косозубого типа «С» с углом наклона зубьев  $45^{\circ}$ , характерно резкое скачкообразное увеличение скорости потока при входе его в зону межзубного пространства. Для косозубого вооружения типа «С» с углом наклона зубьев  $25^{\circ}$  этот процесс протекает более плавно, а для вооружения «М» зависимость сильно выполаживается.

На участке подхода потока к вращающемуся вооружению также зафиксированы некоторые отличия, связанные с большим разгоном жидкости за счет втягивания ее косозубым вооружением, причем чем больше угол наклона зубьев, тем больше его влияние на разгонную динамику потока.

Процесс перемещения жидкости сквозь пространство между зубьями вооружения в условиях стационарного расчёта и установившегося режима возможно разбить на три основные фазы (рисунок 5.33):

- подход потока к области воздействия на него зубьев вооружения;
- проход сквозь пространство между зубьями вооружения;
- выход потока из области воздействия на него зубьев вооружения.

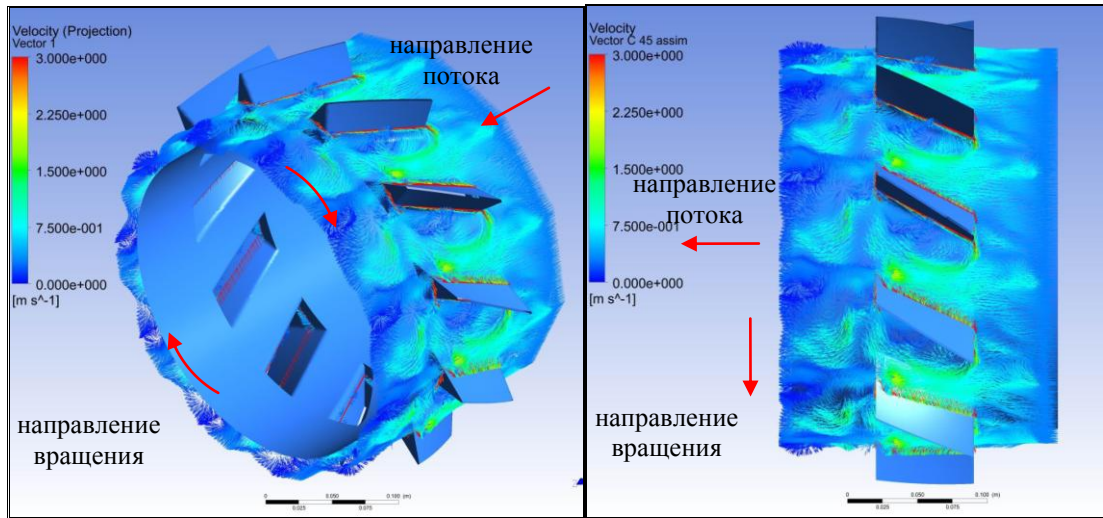


Рисунок 5.30 - Расчетная схема венца с косозубым асимметричным вооружением для бурения мягких пород («М» 25 град)

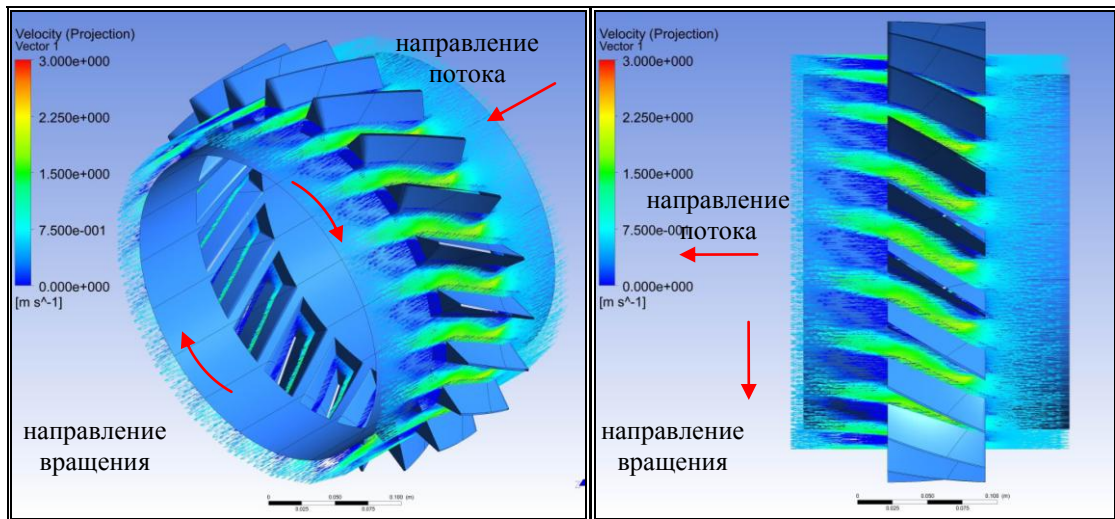


Рисунок 5.31 - Расчетная схема венца с косозубым симметричным вооружением для бурения средних пород («С» 25 град)

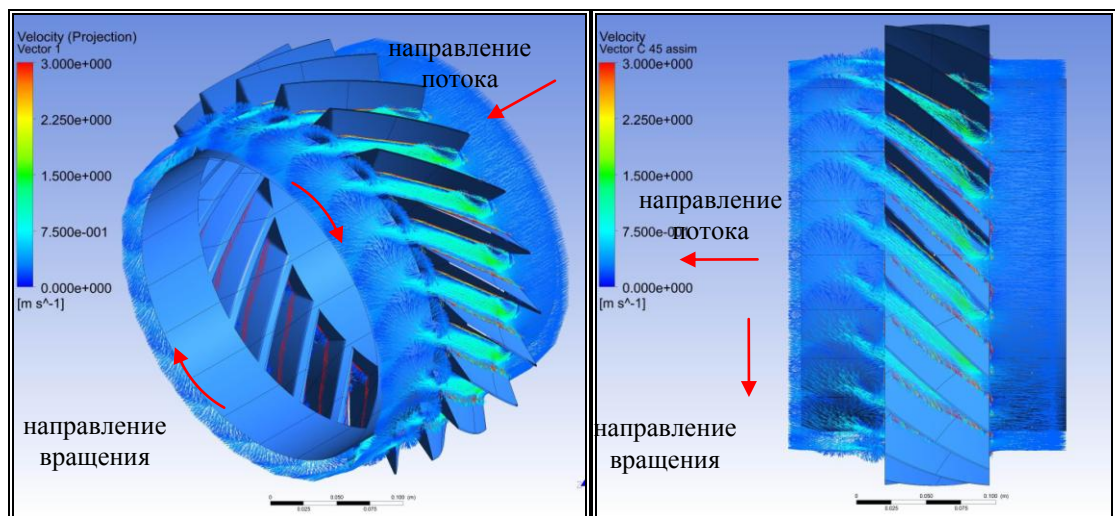


Рисунок 5.32 - Расчетная схема венца с косозубым асимметричным вооружением для бурения средних пород («С» 45 град)

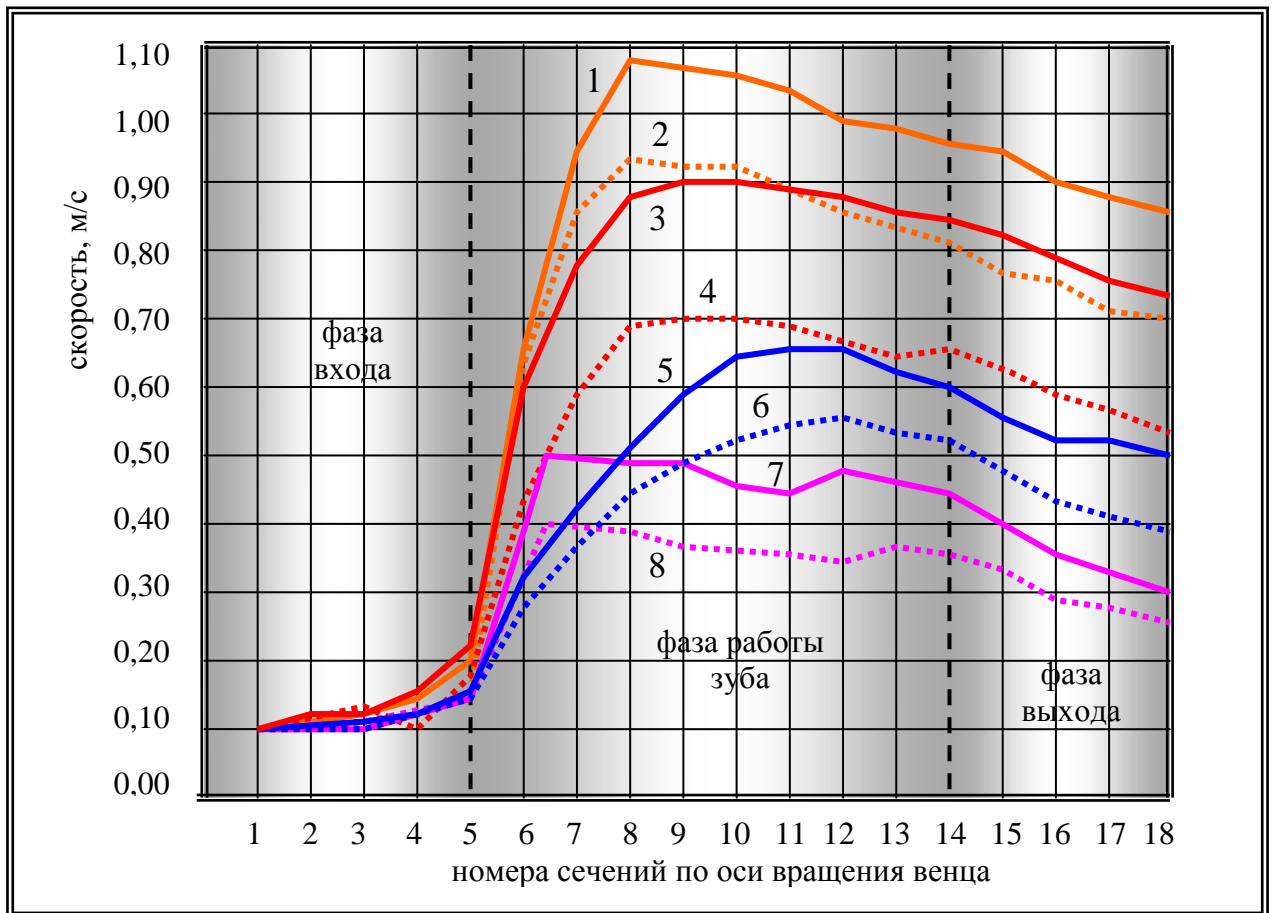


Рисунок 5.33 - Распределение скоростей промывочной жидкости в межзубном пространстве, вращающихся венцов вооружения.

- 1 - КЗВ «С» (косозубость  $45^{\circ}$ ) при 600 об/мин; 2 – КЗВ «С» (косозубость  $45^{\circ}$ ) при 300 об/мин;  
 3 - КЗВ «С» (косозубость  $25^{\circ}$ ) при 600 об/мин; 4 - КЗВ «С» (косозубость  $25^{\circ}$ ) при 300 об/мин;  
 5 - КЗВ «М» (косозубость  $25^{\circ}$ ) при 600 об/мин; 6 - КЗВ «М» (косозубость  $25^{\circ}$ ) при 300 об/мин;  
 7 - прямозубое вооружение «С» (угол наклона  $0^{\circ}$ ) при 600 об/мин;  
 8 – прямозубое вооружение «С» (угол наклона  $0^{\circ}$ ) при 300 об/мин

Первую фазу характеризует плавное незначительное возрастание скорости потока, обусловленное тем, что в условиях установившегося режима вращения венца жидкость, ускоряемая зубчатым вооружением, осуществляет вовлечение остальной части потока в движение, которое соответствует скорости разгоняющегося потока. При этом на входе в пространство между зубьями происходит повышение давления. Это объясняется тем, что входные кромки зубьев вооружения не являются такими же тонкими как у гидравлических лопаточных машин и оборудования, поэтому для того чтобы жидкость начала разгоняться, на входе потоку нужно преодолеть этот своеобразный барьер и войти в пространство между зубьями для последующего взаимодействия с зубчатым вооружением венца. Вторую фазу характеризует резкое увеличение скоростных характеристик потока, вплоть до их максимальных значений, фиксируемых примерно на расстоянии одной трети ширины зубьев венца, с последующим постепенным и плавным уменьшением скорости потока до момента его выхода из области межзубного пространства зубчатого вооружения. В свою очередь, увеличение скоростных характеристик потока происходит и при прохождении прямозубого вооружения. Это связано с тем, что зубья вооружения имеют наклон основных рабочих граней по отношению к направлению движения потока. В связи с этим жидкость, попадая на «наклонную» поверхность, в сочетании с центробежными силами скользит по ней, приобретая дополнительное ускорение. И, наконец, третью заключительную фазу характеризует плавное уменьшение скоростных характеристик потока.

Как отмечалось ранее, увеличение скорости вращения зубчатого венца приводит к увеличению скорости потока жидкости в межзубном пространстве вооружения. Однако в результате проведенных исследований было выявлено, что прирост скорости потока в косозубом вооружении при увеличении скорости вращения венца у вооружения «С» с углом наклона зубьев  $25^{\circ}$  имеет максимальные значения, а для вооружения «С» с углом наклона зубьев  $45^{\circ}$  и «М» с углом наклона зубьев  $25^{\circ}$  величина прироста скорости значительно меньше. На основании полученных результатов, вероятно, можно предположить, что существует некая оптимальная величина угла наклона зубьев, при которой достигается максимальный прирост скорости потока бурового раствора в межзубном пространстве вооружения в зависимости от скорости вращения шарошки.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что использование косозубого вооружения при оснащении ШБИ может значительно повысить эффективность его работы за счет того, что данный тип вооружения обладает лучшей работоспособностью в условиях околонулевых и малых скоростей потока промывочной жидкости и препятствует образованию различных сальников и зон с повышенной концентрацией шлама.

**Выводы по главе 5**

1 Анализ конструкций существующих промывочных узлов и причин потери ими работоспособности позволил установить, что одной из них является ненадежность фиксации гидромониторных насадок в теле шарошечного бурового инструмента. В связи с этим были разработаны и запатентованы несколько конструкций, позволяющих существенно увеличить надежность систем промывки ШБИ.

2 На основе проведенных исследований по изучению процесса истечения струи промывочной жидкости из гидромониторных насадок с внутренним асимметричным поперечным сечением было установлено, что путем изменения геометрии внутреннего поперечного сечения гидромониторных насадок можно не только влиять на форму, но и существенно увеличить скорость истечения в средней части струи промывочной жидкости. Что, в свою очередь, дает возможность повысить не только эффективность работы гидромониторных узлов, но и систем промывки ШБИ в целом.

3 Исследование процессов истечения струй промывочного агента (жидкости) из гидромониторных насадок диффузорного и конфузорного типов с обычным круглым и новым шестиугольным асимметричным внутренним поперечным сечением при помощи компьютерного моделирования в системе Ansys Fluent показало, что использование насадок новой конструкции позволяет увеличить зону (ядро) постоянных скоростей струи на 25 - 30 %.

4 Проведенные исследования истечения промывочного агента (жидкости) из гидромониторных насадок с различной геометрией внутреннего поперечного сечения позволили установить, что с помощью изменения геометрических параметров внутреннего поперечного сечения насадок можно управлять направлением и силой гидравлического потока без существенных конструктивных изменений как самого узла, так и бурового инструмента в целом. На этой основе были разработаны новые конструктивные схемы ШБИ.

5 Впервые были проведены исследования влияния вращающихся зубьев вооружения шарошек бурового инструмента на гидравлическую среду призабойной зоны. В ходе лабораторных экспериментов и математического моделирования в программе Ansys Fluent было установлено, что сила воздействия КЗВ на гидравлическую среду существенно зависит от скорости вращения венцов шарошек, угла наклона и шага зубьев вооружения.



**ГЛАВА 6.****РАЗРАБОТКА НОВЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ШАРОШЕЧНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА С КОСОЗУБЫМ ВООРУЖЕНИЕМ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ****6.1 Разработка конструктивной схемы шарошечного бурового долота с косозубым вооружением и центральной промывкой**

При бурении нефтегазовых скважин ШБИ оснащенным ПЗВ, в особенности средних пород, нередко возникают сложности, связанные с повышенной энергоемкостью, необходимой для успешного разрушения пород данной категории твердости, а также с недостаточно эффективными схемами эвакуации шлама из зоны работы инструмента в затрубное пространство. Объяснение этому заключается в том, что при классической схеме ориентации зубьев (ПЗВ), когда основные рабочие поверхности зубьев ориентированы вдоль образующих шарошек, уже разрушенная порода подвергается повторному многократному перемалыванию зубчатым вооружением шарошек. Это, с одной стороны существенно снижает механическую скорость бурения, а с другой - приводит к повышенному износу основных рабочих поверхностей ШБИ.

Еще одним существенным недостатком ПЗВ является высокая вероятность формирования забойной «рейки» в процессе работы ШБИ, в особенности при проходке пород средней твердости. Все эти моменты оказывают крайне негативное влияние на эффективность работы ШБИ, оснащенного ПЗВ.

Перспективным направлением дальнейшего совершенствования ШБИ для повышения эффективности его работы и конкурентоспособности является разработка и создание различных видов и типов КЗВ.

КЗВ шарошек бурового инструмента, в отличие от широко распространенного ПЗВ, дает возможность управлять направлением эвакуации разрушенной породы не только на поверхности забоя, но и по всей зоне работы инструмента, включая и его надшарошечное пространство.

Важной задачей по совершенствованию процесса очистки инструмента и призабойной зоны в целом является создание условий, не допускающих возникновения противоположных движений между направлениями механической эвакуацией шлама зубчатым вооружением шарошек и основными гидравлическими потоками промывочной жидкости.

В дополнение к этому использование КЗВ дает возможность уже на этапе проектирования бурового инструмента свести к минимуму вероятность увода ШБИ от заданного направления бурения за счет контроля общей осевой составляющей разрушающего усилия на породу забоя КЗВ каждой шарошки ШБИ [120].

С целью повысить эффективность работы ШБИ путем снижения энергетических затрат, необходимых для разрушения разбуриваемых пород, а также облегчения эвакуации шлама из зоны работы инструмента и всей призабойной зоны была разработана конструктивная схема ШБИ, оснащенного центральным промывочным узлом и КЗВ (рисунок 6.1).

Главным отличием новой конструктивной схемы ШБИ со стальным армированным зубчатым вооружением от существующих на сегодня аналогов является то, что шарошки оснащены КЗВ с одинаковыми суммарными осевыми составляющими усилий одновременного воздействия их зубьев на гидравлическую среду забоя и направленными от центра вращения инструмента [73].

На (рисунок 6.1) представлена перспективная схема ШБИ, состоящего из: лап 1, имеющих наклонные цапфы 2, на которых на подшипниках установлены шарошки 3 со стальными армированными зубьями 4. Все шарошки оснащены венцами с наклонными зубьями 4, при этом наклон зубьев (угол  $\alpha$ ) к образующей шарошки составляет  $5^\circ \div 45^\circ$ , где меньшая его величина соответствует большей величине угла наклона цапфы 2 по отношению к оси вращения ШБИ. В процессе работы инструмента, промывочная жидкость, прокачиваемая через центральный промывочный узел 5, размещенный на оси вращения 6 ШБИ, направляет частицы разрушенной породы в сторону периферии скважины и пространства между шарошками 7. При этом незначительная часть перемолотого шлама попадает в область, расположенную между калибрующими конусами 8 шарошек 3 и торцом 9 корпуса ШБИ, тем самым способствуя образованию там шламовой пробки. Это во многих случаях, в особенности при бурении глинистых пород, может приводить к частичному или полному заклиниванию шарошек 3. Чтобы исключить это негативное явление, а также повысить эффективность удаления уже разрушенной породы с поверхности забоя, в данной конструктивной схеме применяются шарошки 3 с определенной величиной наклона зубьев 4, основные боковые рабочие грани которых воздействуют на гидравлическую среду забоя с усилием  $\vec{F}$ . Осевая составляющая этого усилия  $\vec{F}_0$  направлена в сторону свободного пространства между шарошками 7 и устья скважины. В свою очередь, сила  $\vec{F}$ , с которой основные боковые рабочие грани зубьев воздействуют на гидравлическую среду, направлена перпендикулярно к оси вращения и по касательной к образующей шарошки. Вследствие наличия наклона зубьев шарошки, при воздействии каждого зуба вооружения на гидравлическую среду, усилие  $\vec{F}$  автоматически раскладывается на две свои составляющие:  $\vec{F}_n$  - нормальную, то есть направленную перпендикулярно по отношению к боковой рабочей грани зуба, и  $\vec{F}_3$  - тангенциальную, направленную вдоль боковых рабочих поверхностей зубьев вооружения.

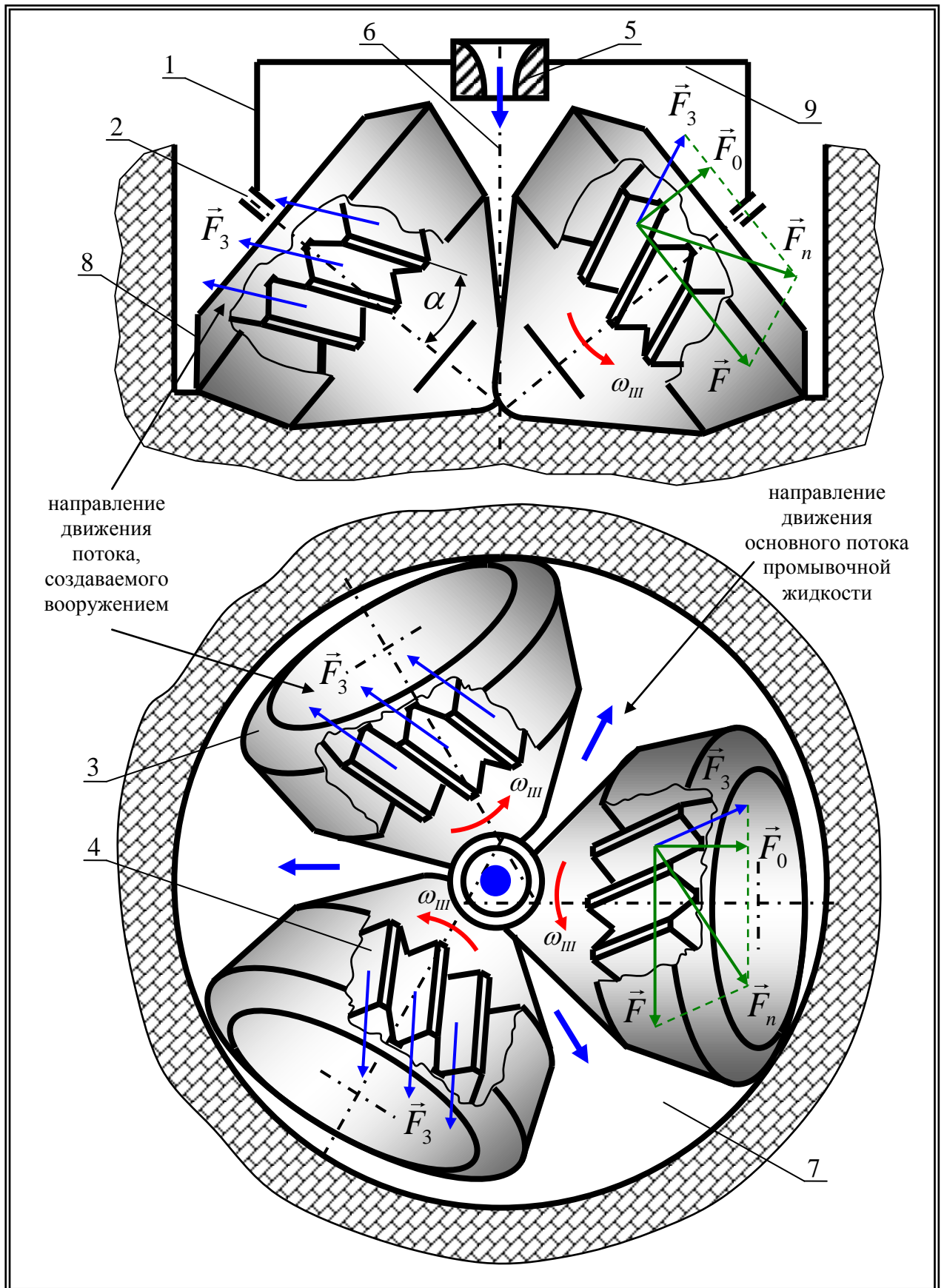


Рисунок 6.1 - Конструктивная схема ШБИ с КЗВ и центральным промывочным узлом

В процессе работы ШБИ его шарошки, оснащенные КЗВ, перекачиваются по поверхности забоя и одновременно вращаются вокруг собственных осей, в результате чего возникающая сила  $\vec{F}_3$  принуждает часть промывочного агента (жидкости), обогащенного шламом, захватываемого КЗВ, перемещаться по направлению действия данной силы. В результате создаются условия, позволяющие управлять направлением и интенсивностью процесса гидромеханической эвакуации разрушенной породы посредством изменения направлений и величин углов наклона зубьев каждого из венцов шарошек. Однако при этом должно соблюдаться одно условие, все шарошки 3 должны быть оснащены КЗВ с одинаковыми суммарными осевыми составляющими усилий одновременного воздействия их зубьев 4 на гидравлическую среду забоя и направленными от центра вращения инструмента.

Принцип работы конструкции сводится следующему. При осуществлении вращения ШБИ его шарошки 3 перемещаются по забою с незначительным проскальзыванием, связанным с отличием геометрии шарошек от параметров конуса «чистого качения» [61], и разбуривают породу под действием крутящего момента и вертикальной нагрузки на инструмент. Оснащение ШБИ перспективным КЗВ дает возможность повысить разрушающую способность вооружения при проскальзывании его зубьев 4 по забою. Особенно это важно при бурении пластичных горных пород. Шлам, благодаря изготовлению всех венцов с зубьями 4, имеющими наклон относительно образующих шарошек 3, при выходе зубьев 4 из взаимодействия с поверхностью забоя перемещается в сторону периферии (рисунок 6.1). Там он подхватывается промывочной жидкостью и зубьями 4 КЗВ, которые, выполняя функцию лопастей шнека, подают обогащенную шламом промывочную жидкость через пространства между шарошками 7 в затрубное пространство. За счет выполнения шарошек 3 с одинаковыми рабочими поверхностями для выноса шлама существенно уменьшается вероятность возникновения на забое турбулентных потоков, что в свою очередь гарантирует равномерную эвакуацию шлама из зоны забоя и сводит к минимуму повторное измельчение уже разрушенной породы и образование различных шламовых пробок.

Проведенные исследования позволили разработать новую конструктивную схему ШБИ, предназначенного для бурения мягких и средних пород, оснащенного центральным промывочным узлом новой конструкции и однонаправленным КЗВ (рисунок 6.2).

Главной отличительной особенностью новой конструкции является обеспечение условий, не допускающих возникновение противоположных движений, между направлениями механической эвакуацией шлама зубчатым вооружением шарошек и основными гидравлическими потоками промывочной жидкости, распространяющимися из центрального гидромониторного узла [117]. Промывочный агент (жидкость) под давлением, создаваемым буровым насосом,

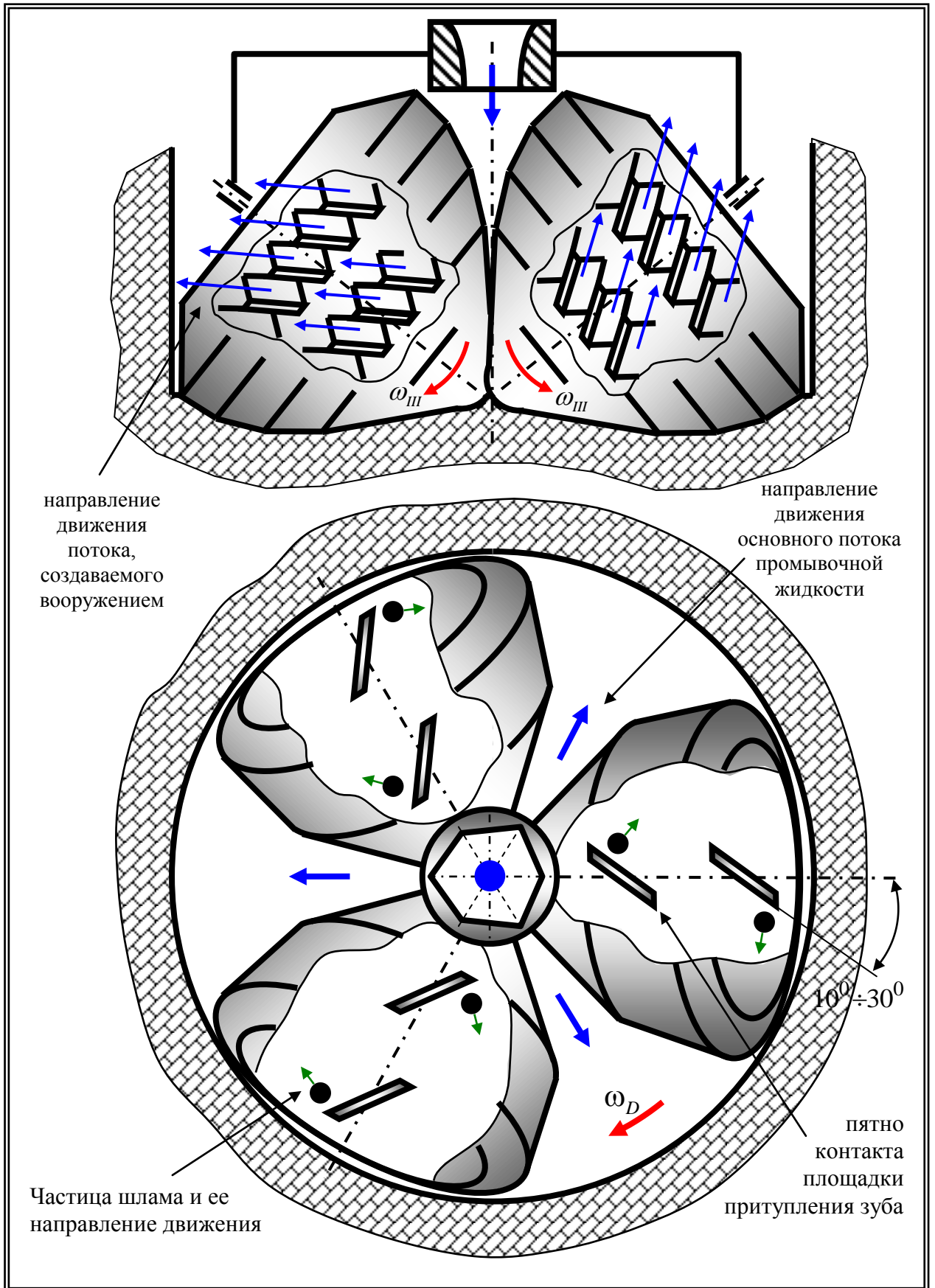


Рисунок 6.2 - Схема воздействия однонаправленного КЗВ шарошек ШБИ на забой и гидравлическую среду зоны бурения

проходит сквозь центральный гидромониторный узел [117] и движется от центра долота к его периферии, далее уходя вверх в затрубное пространство. В свою очередь, проскальзывающее по поверхности забоя КЗВ эвакуирует шлам в том же направлении.

Технический результат достигается тем, что вершинные, основные и периферийные венцы вооружения всех шарошек оснащены КЗВ с левым подъемом винтовой линии наклонных зубьев, (рисунок 6.2). Зубья при этом имеют клиновидную асимметричную форму [61].

Такое конструкторское решение дает возможность существенно повысить эффективность работы ШБИ. Так в отличие от инструмента с ПЗВ, «шнековый» эффект КЗВ, позволяет успешно бороться с застойными зонами в призабойном пространстве, а также способствует лучшей очистке зубьев при прохождении ими гидравлической среды. В дополнении к этому, в зоне непосредственного разрушения породы забоя, косозубое вооружения, так же посредством «шнекового» эффекта, дает возможность механически извлекать частицы шлама из лунок, образуемых на поверхности забоя, зубьями вооружения в процессе работы ШБИ, и тем самым, уменьшать вероятность многократного повторного измельчения разрушенной породы.

При этом расположение и наклон зубьев вооружения на каждой из шарошек рассчитывается так, чтобы суммарная осевая составляющая ответной реакции забоя, для всех шарошек имела одинаковую величину. Это условие обеспечивает необходимую центровку шарошечного бурового долота в процессе его работы.

Принцип работы инструмента, сводится следующему. При осуществлении вращения долота его шарошки перемещаются по забою с незначительным проскальзыванием, связанным с отличием геометрии шарошек от параметров конуса «чистого качения» [61], и разбуривают породу под действием крутящего момента и вертикальной нагрузки. Разрушаемая порода, за счет того, что вершинные и периферийные венцы вооружения шарошек оснащены КЗВ с левым подъемом винтовой линии наклонных зубьев, удаляется посредством «шнекового» эффекта в направлении стенки скважины и, как следствие не попадает в зону работы зубчатого вооружения, расположенного на основных конусах шарошек. Это механическое действие на породу значительно повышает эффективность очистки забоя. Этому способствует и то, что основной поток промывочной жидкости из центрального сопла направляет шлам в сторону стенок скважины, а также выбор угла наклона режущих кромок косых зубьев к образующей шарошки в пределах  $10 - 30^{\circ}$ . Указанный угол является наиболее оптимальным при удалении шлама в процессе бурения средних пород. Помимо этого, улучшению разрушения породы и очистки забоя от шлама способствует выполнение углов наклона передних граней наклонных зубьев к поверхности забоя (по направлению проскальзывания зубьев) больше, нежели у задних. Такая геометрия зубчатого вооружения, позволяет обеспечить уменьшение переднего угла резания (скалывания) зубьев шарошек в процессе их воздействия на забой, и тем самым увеличить раз-

рушающую способность вооружения. Это конструктивное решение так же позволяет снизить эффект блокировки шлама в пространстве между зубьями вооружения и прижатие разрушенной породы к поверхности забоя и обеспечивает более благоприятные условия для свободного удаления шлама в затрубное пространство скважины [61].

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что совместное использование КЗВ с центральной гидромониторной схемой промывки при оснащении ШБИ, может значительно повысить эффективность его работы, за счет того, что данный тип вооружения обладает лучшей работоспособностью в условиях около нулевых и малых скоростей потока промывочной жидкости и в сочетании с центральным гидромониторным узлом новой конструкции, препятствует образованию различных сальников и зон с повышенной концентрацией шлама. Это позволяет существенно снизить зашламленность призабойной зоны и улучшить условия работы инструмента, и тем самым повысить механическую скорость и проходку ШБИ, при одновременном снижении стоимости бурения.

## **6.2 Разработка конструктивных схем шарошечных буровых долот с косозубым вооружением и боковой гидромониторной промывкой**

Одним из важных факторов, оказывающих существенное влияние на эффективность работы ШБИ, наряду с совершенством геометрии вооружения и надежности подшипниковых узлов, является качество очистки инструмента и всей призабойной зоны от разрушаемой в процессе бурения горной породы. Знание, протекающих в зоне работы ШБИ гидродинамических процессов, дает возможность рассчитывать интенсивность и степень очистки забоя и бурового инструмента от шлама, и определять степень эффективности различных схем промывки.

Анализ движения основных потоков промывочной жидкости и их влияния на качество очистки забоя от выбуренной породы, проведенный в первой главе, показал, что, несмотря на все свои преимущества, боковая симметричная гидромониторная схема промывки ШБИ имеет ряд значительных недостатков. В связи с этим, существует необходимость поиска и разработки новых конструктивных решений, позволяющих повысить эффективность очистки забоя.

Перспективным и мало затратным способом, позволяющим успешно бороться с образованием «застойных» зон, нередко формирующихся в разных областях забоя, является оснащение ШБИ косозубым вооружением. Этот тип зубчатого вооружения позволяет превращать в миниатюрные шнеки зубчатые венцы шарошек, которые в областях, с пониженными или около нулевыми скоростями потоков промывочной жидкости, механическим способом перемещают шлам в нужном, для каждой отдельно взятой конструкции ШБИ, направлении.

С целью повысить эффективность работы ШБИ путем снижения энергетических затрат, необходимых для разрушения мягких и средних пород, и более качественной очистки забоя от шлама, за счет облегчения его эвакуации из зоны работы инструмента и всей призабойной зоны, была разработана конструктивная схема ШБИ, оснащенного боковыми, симметрично расположенными, промывочными узлами и разнонаправленным КЗВ (рисунок 6.3).

Главным отличием новой конструктивной схемы ШБИ со стальным армированным зубчатым вооружением, от существующих на сегодня аналогов, является то, что периферийные венцы вооружения шарошек оснащены КЗВ с левым подъемом винтовой линии наклонных зубьев, в то время как вершинные и основные венцы оснащены КЗВ с правым подъемом винтовой линии наклонных зубьев. При этом, оси боковых гидромониторных узлов промывочной системы ШБИ, ориентированы на область забоя, расположенную между периферийным и соседним с ним венцом основного конуса каждой из шарошек, с таким расчетом, чтобы как минимум, ось одного из промывочных узлов была направлена к поверхности, перпендикулярной к оси ШБИ, под углом  $90^0 \div 100^0$ , а ось другого –  $80^0 \div 90^0$  [76].

На (рисунок 6.3) представлена перспективная схема ШБИ, состоящего из: лап 1, имеющих наклонные цапфы 2, на которых на подшипниках установлены шарошки 3 со стальными армированными зубьями и размещенными между шарошками 3 гидромониторными промывочными узлами 4 с насадками 6. Периферийные венцы вооружения шарошек 3 оснащены КЗВ с левым подъемом винтовой линии наклонных зубьев 5, в то время как вершинные и основные венцы оснащены КЗВ с правым подъемом винтовой линии наклонных зубьев 6. При этом оси боковых гидромониторных узлов 7 промывочной системы ШБИ, ориентированы на область забоя, расположенную между периферийным и соседним с ним венцом основного конуса каждой из шарошек. В зависимости от способов, режимов бурения и свойств горных пород, углы наклона осей гидромониторных промывочных узлов по отношению к поверхности забоя выбирается из диапазона  $80^0 - 100^0$  к плоскости, расположенной под прямым углом к оси вращения ШБИ. Чем мягче разбуриваемые породы, и как следствие присутствие на забое больших объемов шлама, тем большие значения углов наклона оси струи промывочной жидкости, должны быть по отношению к поверхности забоя. Так как именно это направление струи обеспечивает незамедлительное и беспрепятственное удаление разрушаемой породы из зоны работы инструмента и направление ее в затрубное пространство. Помимо этого, отраженные части струй промывочной жидкости образуют поперечные потоки, очищающие центральную часть забоя и зубчатое вооружение вершинных и основных венцов шарошек инструмента. Это позволяет свести до минимума повторное многократное перемалывание, уже разрушенной породы, зубьями шарошек и практически исключить вероятность гидроабразивного износа зубчатого вооружения



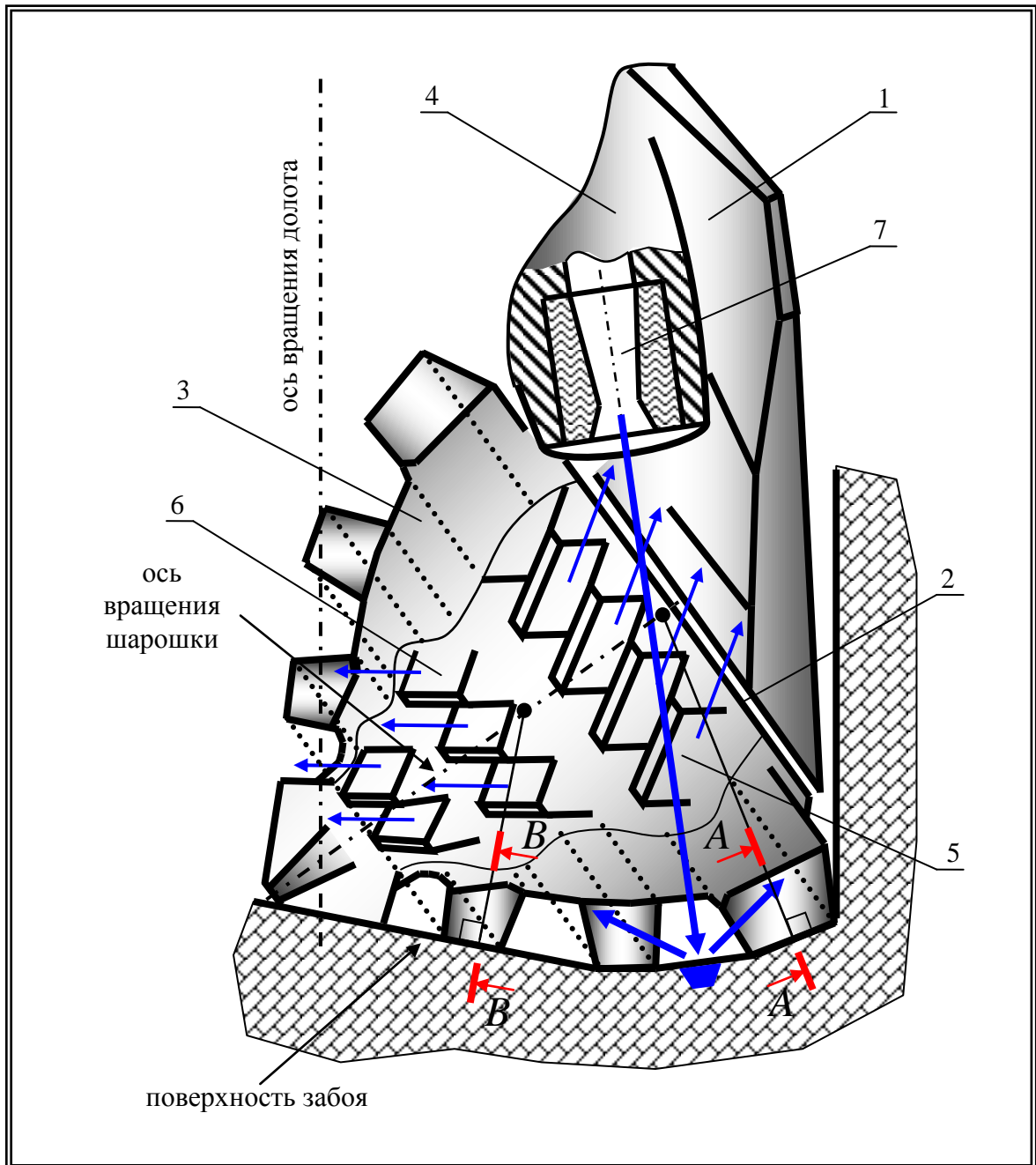


Рисунок 6.3 - Принципиальная схема секции ШБИ с КЗВ и специально ориентированным гидромониторным узлом

ШБИ струями промывочного агента (жидкости).

Проведенные исследования, позволили разработать новую конструктивную схему ШБИ, предназначенного для бурения мягких и средних пород, оснащенного симметрично расположенными тремя боковыми промывочными узлами новой конструкции и разнонаправленным КЗВ (рисунок 6.4). Главной отличительной особенностью новой конструкции является обеспечение условий, не допускающих возникновения противоположных движений, между направлениями механической эвакуацией шлама зубчатым вооружением шарошек и основными гидравлическими потоками промывочной жидкости, распространяющимися из боковых симметрично расположенных трех гидромониторных насадок новой конструкции [116].

Принцип работы инструмента, сводится следующему. При осуществлении вращения ШБИ, его шарошки перемещаются по забою с незначительным проскальзыванием, связанным с отличием геометрии шарошек от параметров конуса «чистого качения», и под действием крутящего момента и вертикальной нагрузки на ШБИ, разбуривают породу забоя, одновременно осуществляя калибрование стенки скважины. В свою очередь промывочный агент (жидкость), которая прокачивается через боковые, симметрично расположенные гидромониторные узлы, эвакуирует шлам из зоны работы инструмента и всей зоны забоя.

Благодаря разработанной новой схеме разнонаправленного КЗВ, основных и периферийных венцов шарошек ШБИ, и специально ориентированных гидромониторных промывочных узлов, на поверхности забоя создаются поперечные потоки промывочной жидкости, позволяющие направлять одну из частей потока, обогащенного частицами разрушенной породы, в направлении стенок скважины, а оставшуюся – в центр забоя, с дальнейшим его отводом в затрубное пространство. Промывочный агент (жидкость), под давлением, создаваемым буровым насосом, проходит сквозь боковые, симметрично расположенные, гидромониторные насадки и движется в направлении забоя. Далее, соударяется с ним в области, лежащей на окружности, равной диаметру ШБИ минус удвоенная длина зубьев и половина ширины межвенцового зазора, разделяющего периферийный - калибрующий и смежный с ним венец вооружения каждой шарошки. За счет определенным образом рассчитанных мест соударения струй с забоем, они разделяются и подхватываются, посредством «шнекового» эффекта, разнонаправленным КЗВ периферийных и соседних с ними венцами. При этом часть струи, которая подхватывается КЗВ основных венцов, перемещается к центру вращения ШБИ, и в свою очередь, проскальзывающее вооружение по забою, так же, посредством «шнекового» эффекта, перемещает разрушенную породу аналогичном направлении. Затем, вследствие разности геометрических размеров шарошек, а также их зубчатого вооружения, основной поток из центра вращения ШБИ частично, претерпевает перераспределение в направлении третьей, самой короткой из всех шарошек.

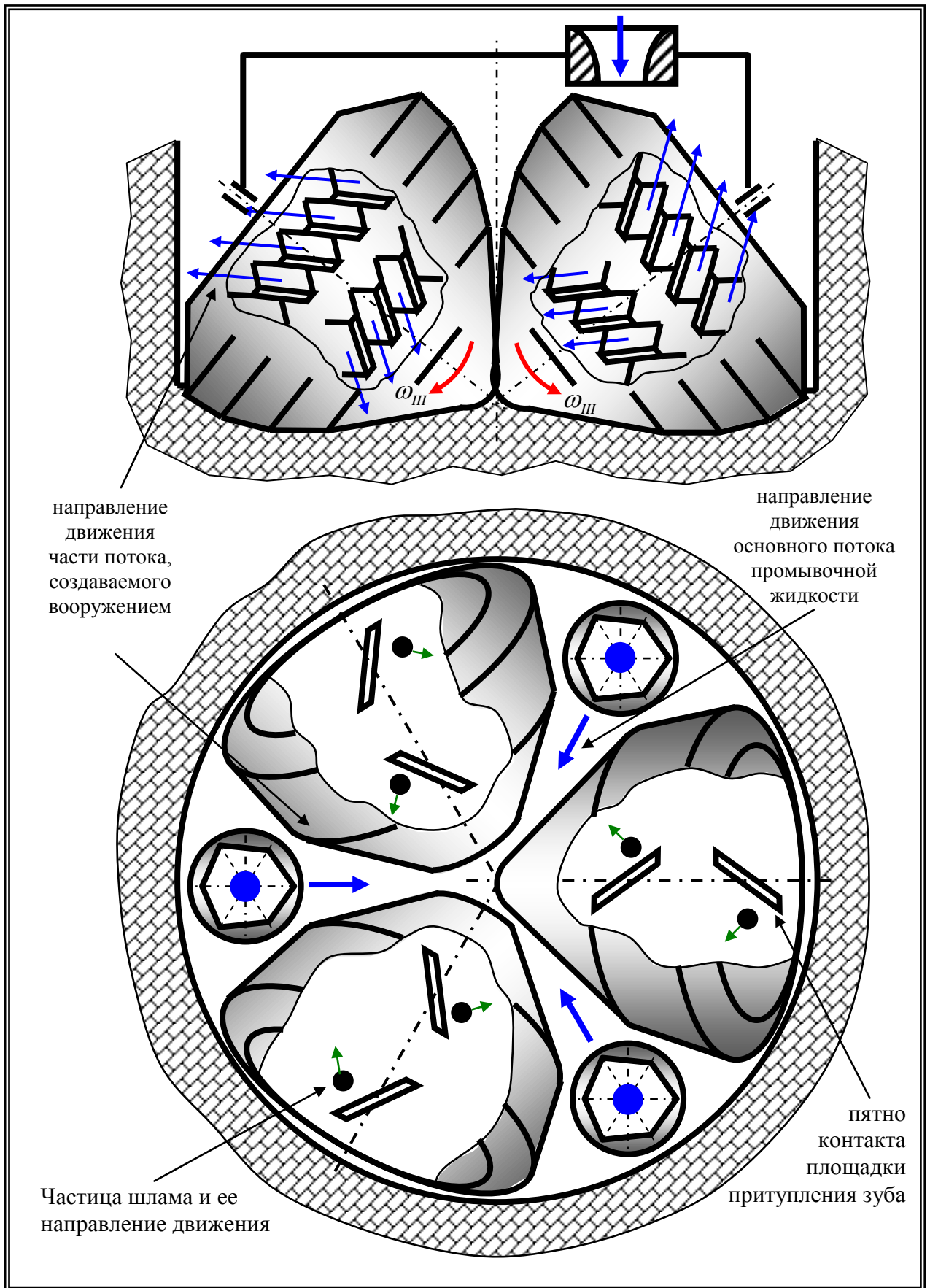


Рисунок 6.4 - Схема воздействия разнонаправленного КЗВ шарошек ШБИ на забой и гидравлическую среду зоны бурения

Оставшиеся части струй, подхватываются КЗВ калибрующих венцов и сразу двигаются в направлении периферии ШБИ и затем эвакуируются в затрубное пространство. При этом проскальзывающее по забою КЗВ, посредством «шнекового» эффекта, перемещает разрушенную породу в направлении центра вращения ШБИ, и за счет этого, отваливает ее от стенок скважины. Однако, как только зубья калибрующих венцов шарошек, выходят из взаимодействия с породой забоя и входят в область гидравлической среды призабойной зоны, так же посредством «шнекового» эффекта они начинают перемещать, поднимаемую с поверхности забоя шламовую взвесь, в направлении периферии ШБИ. В результате осуществляется совпадение направлений основных потоков промывочного агента (жидкости) и турбулентных потоков, создаваемых калибрующими венцами КЗВ.

Таким образом, совместное использование разнонаправленного КЗВ с боковой гидромониторной симметричной схемой промывки при оснащении ШБИ, может значительно повысить эффективность его работы, за счет того, что данный тип вооружения обладает лучшей работоспособностью в условиях около нулевых и малых скоростей потока промывочной жидкости и в сочетании с боковыми, симметрично расположенными, гидромониторными узлами новой конструкции, препятствует образованию различных сальников и зон с повышенной концентрацией шлама. Это позволяет существенно снизить зашламленность призабойной зоны и улучшить условия работы инструмента, и тем самым повысить механическую скорость и проходку ШБИ, при одновременном снижении стоимости бурения.

Наряду с классической боковой гидромониторной симметричной схемой промывки, в настоящее время широкое распространение при оснащении бурового инструмента, получила боковая асимметричная схема промывки. Однако, проведенные ранее исследования, направленные на изучение того, как основные гидравлические потоки, влияют на качество очистки забоя от шлама, а также анализ износа зубчатого вооружения шарошек отработанного ШБИ, выявил в боковой асимметричной гидромониторной схеме промывки наличие целого ряда существенных недостатков.

С целью повысить эффективность работы ШБИ, путем снижения энергетических затрат, необходимых для разрушения мягких и средних пород, и более качественной очистки забоя от шлама, за счет облегчения его эвакуации из зоны работы инструмента и всей призабойной зоны, была разработана конструктивная схема ШБИ, оснащенного боковыми, асимметрично расположенными, промывочными узлами и КЗВ (рисунок 6.5).

Главным отличием новой конструктивной схемы ШБИ со стальным армированным зубчатым вооружением, от существующих на сегодня аналогов, является то, что шарошки оснащены КЗВ, при этом 1-я шарошка, расположенная между боковыми промывочными гидромониторными узлами, обладает зубьями, наклоненными к оси цапфы так, чтобы суммарная осевая

составляющая общего усилия одновременного воздействия всех ее наклонных зубьев на гидравлическую среду забоя, была направлена в сторону оси вращения инструмента, а у соседних шарошек - в противоположную сторону.

На (рисунок 6.5) представлена перспективная схема ШБИ, состоящего из лап 1, имеющих наклонные цапфы 2, на которых на подшипниках установлены шарошки 3 со стальными армированными зубьями 4, основного канала для отвода шлама 5 и гидромониторных промывочных узлов 6, размещенных между шарошками 3. Все шарошки оснащены венцами с наклонными зубьями 4, при этом наклон зубьев (угол  $\alpha$ ) к образующей шарошки составляет  $5^\circ \div 45^\circ$  и зависит от физико-механических характеристик разрушаемых горных пород. При этом шарошки, расположенные по обе стороны от основного канала для отвода шлама 5, оснащены КЗВ, меньшая величина угла наклона зубьев которого соответствует большей величине угла наклона цапфы лапы к оси вращения ШБИ, в то время как у 1-й шарошки – наоборот [125].

На этом же рисунке представлена принципиальная схема сил, действующих на гидравлическую среду забоя основными рабочими боковыми поверхностями КЗВ при работе ШБИ. Сила  $\vec{F}$ , с которой основные боковые рабочие грани зубьев воздействуют на гидравлическую среду, направлена перпендикулярно к оси вращения и по касательной к образующей шарошки. Вследствие наличия наклона зубьев шарошки, при воздействии каждого зуба вооружения на гидравлическую среду, усилие  $\vec{F}$  автоматически раскладывается на две свои составляющие:  $\vec{F}_n$  - нормальную, то есть направленную перпендикулярно по отношению к боковой рабочей грани зуба, и  $\vec{F}_3$  - тангенциальную, направленную вдоль боковых рабочих поверхностей зубьев вооружения.

В процессе работы ШБИ его шарошки, оснащенные КЗВ, перекатываются по поверхности забоя и одновременно вращаются вокруг собственных осей, в результате чего возникающая сила  $\vec{F}_3$  принуждает часть промывочного агента (жидкости), обогащенного шламом, захватываемого КЗВ, перемещаться по направлению действия данной силы. В зависимости от способов, режимов бурения и свойств горных пород, определяются углы наклона зубьев 4. Чем мягче разбуриваемые породы и, как следствие, присутствие на забое больших объемов шлама, тем большие значения углов наклона зубьев 4. Это позволяет с большей эффективностью перемещать разрушенную породу в направлении основного канала для отвода шлама 5 первой шарошкой ШБИ. Затем шлам эвакуируется в затрубное пространство двумя оставшимися шарошками 3, расположенными с двух сторон канала 5, что дополнительно позволяет минимизировать повторное перемалывание шлама зубчатым вооружением ШБИ. При этом на первой шарошке 3, расположенной между боковыми промывочными гидромониторными узлами 6, зубья 4

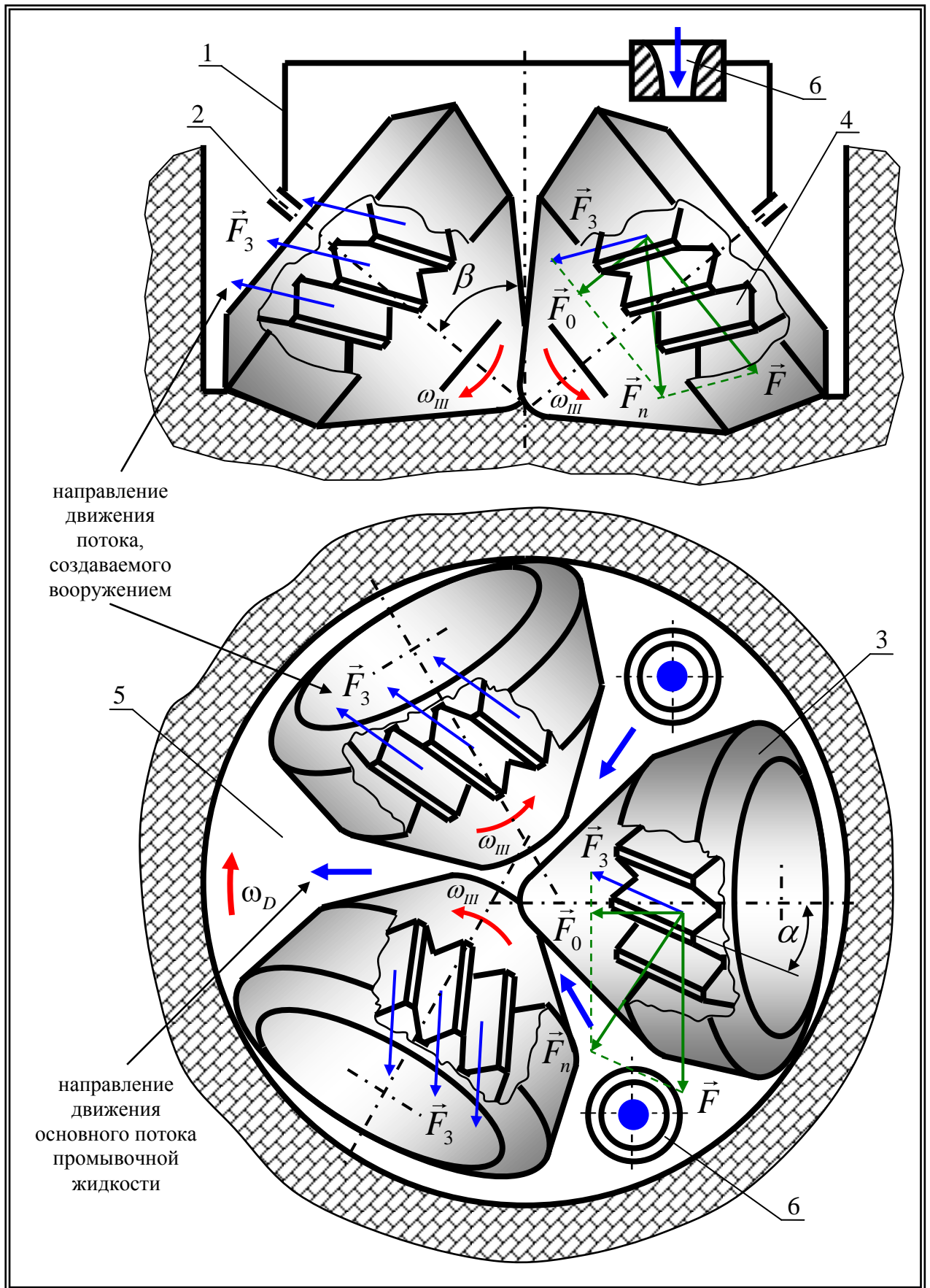


Рисунок 6.5 - Конструктивная схема ШБИ с КЗВ

и боковыми, асимметрично расположенными промывочными узлами

наклонены к оси цапфы 2 с таким расчетом, чтобы результирующая осевая составляющая  $\vec{F}_0$  общего усилия  $\vec{F}$  одновременного воздействия всех наклонных зубьев на гидравлическую среду забоя была направлена в сторону оси вращения инструмента. А у соседних шарошек 3, в противоположную сторону.

Принцип работы инструмента сводится следующему. При осуществлении вращения ШБИ его шарошки 3 перемещаются по забою с незначительным проскальзыванием, связанным с отличием геометрии шарошек от параметров конуса «чистого качения», и под действием крутящего момента и вертикальной нагрузки на ШБИ разбуривают породу забоя, одновременно осуществляя калибрование стенки скважины. В свою очередь промывочный агент (жидкость), которая прокачивается через боковые, асимметрично расположенные гидромониторные узлы 6, эвакуирует шлам из зоны работы инструмента и всей зоны забоя. Благодаря разработанной новой схеме однонаправленного КЗВ, основных и периферийных венцов 4 шарошек 3 ШБИ, и специально ориентированных гидромониторных, асимметрично расположенных промывочных узлов, на поверхности забоя создаются поперечные потоки промывочной жидкости, позволяющие направлять поток промывочного агента (жидкости), обогащенного частицами разрушенной породы, в направлении основного канала для отвода шлама 5.

Проведенные исследования позволили разработать новую конструктивную схему ШБИ, предназначенного для бурения мягких и средних пород, оснащенного боковыми, асимметрично расположенными промывочными узлами новой конструкции и однонаправленным КЗВ (рисунок 6.6). Главной отличительной особенностью новой конструкции является обеспечение условий, не допускающих возникновение противоположных движений, между направлениями механической эвакуацией шлама зубчатым вооружением шарошек и основными гидравлическими потоками промывочной жидкости, распространяющимися из двух боковых асимметрично расположенных гидромониторных узлов. Промывочный агент (жидкость) под давлением, создаваемым буровым насосом, проходит сквозь боковые, асимметрично расположенные гидромониторные насадки и движется в направлении к оси вращения ШБИ и затем к периферии через основной канал для отвода шлама. Шарошка, расположенная между боковыми гидромониторными узлами, оснащенная КЗВ, посредством «шнекового» эффекта своего вооружения, перемещает шлам в том же направлении. Оставшиеся две шарошки, располагающиеся с двух сторон основного канала для отвода шлама, выполнены с КЗВ с противоположной направленностью зубьев, и посредством «шнекового» эффекта их КЗВ перемещают шлам в направлении периферии ШБИ [72]. В зависимости от способов, режимов бурения и свойств горных пород, определяются углы наклона зубьев. Чем мягче разбуриваемые породы и, как следствие, присутствие на забое больших объемов шлама, тем должны быть большие значения углов наклона зубьев.

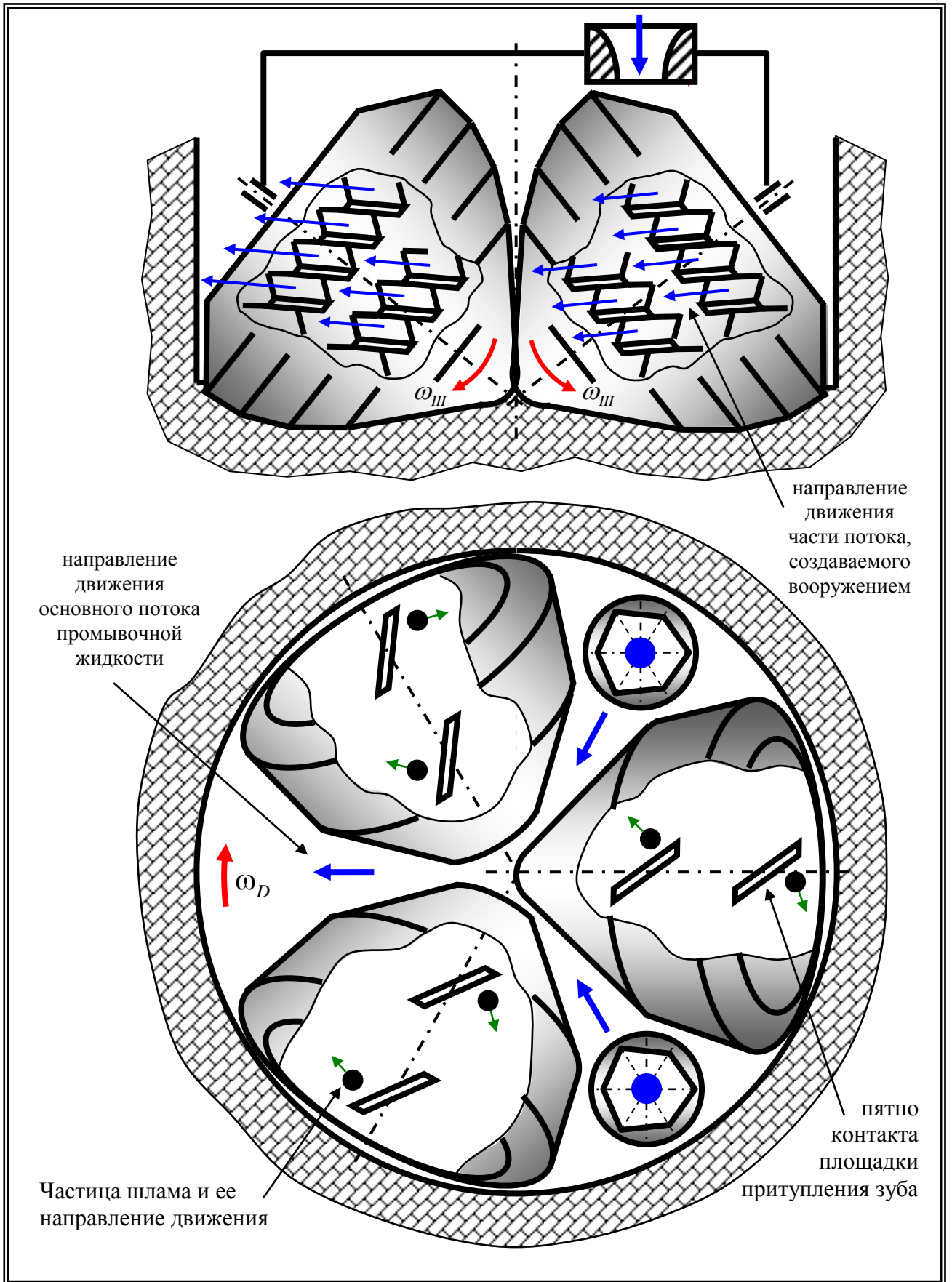


Рисунок 6.6 - Схема воздействия однонаправленного КЗВ шарошек ШБИ на забой и гидравлическую среду зоны бурения



Это позволяет обеспечивать более эффективное перемещение разрушенной породы в направлении основного канала для отвода шлама и минимизировать ее повторное многократное измельчение зубчатым вооружением ШБИ.

Принцип работы инструмента сводится к следующему. При осуществлении вращения ШБИ его шарошки перемещаются по забою с незначительным проскальзыванием и под действием крутящего момента и вертикальной нагрузки на ШБИ разбуривают породу забоя, одновременно осуществляя калибрование стенки скважины. В свою очередь промывочный агент (жидкость), которая прокачивается через боковые, асимметрично расположенные гидромониторные узлы, эвакуирует шлам из зоны работы инструмента и всей зоны забоя. За счет размещения первой шарошки, обладающей наибольшими высотой и количеством наклонных зубьев напротив основного канала для отвода шлама, а также оснащения ее наклонными зубьями, направление подъема винтовых линий площадок притупления которых совпадает с направлением вращения ШБИ, обеспечивается быстрая беспрепятственная эвакуация больших объемов разрушаемой породы, непосредственно в сторону шламоотводящего канала. Вторая и третья шарошки выполнены с КЗВ, имеющим противоположную направленность. Поэтому в процессе их проскальзывания их вооружения по поверхности забоя шлам механическим образом перемещается в направлении периферии ШБИ, что совпадает с направлением основного потока промывочного агента (жидкости) ШБИ с гидромониторной асимметричной схемой промывки [62]. Более того, шарошка, размещенная прямо перед основным каналом для отвода шлама, имеет периферийный венец, с наибольшей длиной зубьев (в сравнении с периферийными венцами смежных шарошек), имеющих левое направление подъема образующих винтовых линий площадок притупления. Это конструктивное решение позволяет обеспечить более интенсивное эвакуирование разрушенной породы из основного канала для отвода шлама и беспрепятственное его перемещение в затрубное пространство.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что совместное использование КЗВ с боковой гидромониторной асимметричной схемой промывки при оснащении ШБИ может значительно повысить эффективность его работы за счет того, что данный тип вооружения обладает лучшей работоспособностью в условиях околонулевых и малых скоростей потока промывочной жидкости и в сочетании с боковыми, асимметрично расположенными гидромониторными узлами новой конструкции, препятствует образованию различных сальников и зон с повышенной концентрацией шлама. Это позволяет существенно снизить зашламленность призабойной зоны и улучшить условия работы инструмента и тем самым повысить механическую скорость и проходку ШБИ при одновременном снижении стоимости бурения.

### 6.3 Совершенствование геометрии вооружения ведомых венцов шарошечного бурового инструмента

Как было отмечено ранее, геометрия вооружения существующего шарошечного бурового инструмента не обеспечивает высокую эффективность энергоемкости процесса разрушения породы, связанную с выполнением зубьев неоптимальной с точки зрения траектории их движения конфигурации. Это обстоятельство приводит к необходимости осуществлять процесс бурения при значительно больших величинах крутящего момента и вертикальной нагрузки на долото [124].

Поэтому на основании проведенных ранее исследований была поставлена задача повысить работоспособность и эффективность ШБИ посредством снижения затрат мощности на разрушение породы и увеличения производительности механического удаления шлама из лунок, образуемых в поверхности забоя рабочими поверхностями каждого зуба вооружения.

Поставленная цель может быть достигнута за счет использования новой геометрии зубьев вооружения шарошек, отличающейся от стандартной тем, что передняя по отношению к направлению проскальзывания вооружения грань зуба, работающего в режиме пробуксовки или подтормаживания, наклонена по отношению к линии, соединяющей вершину зуба с осью вращения шарошки в сечении, перпендикулярном образующей шарошки, под углом  $\gamma = (0 \div 18^\circ)$ , а угол между линией, соединяющей вершину зуба с осью вращения шарошки и поверхностью площадки притупления, составляет  $\alpha = (60 \div 85^\circ)$ . При этом [126]:

- площадка притупления в сечении, перпендикулярном образующей шарошки, может быть выполнена со скосом по всей длине рабочей части зуба в виде ломаной линии или в виде части сферы;

- при выполнении площадки притупления в виде ломаной поверхности ширина площадки  $h$ , перпендикулярной по отношению к линии, соединяющей вершину зуба с осью вращения шарошки, составляет  $(0.25 \div 0.5)H$  - общей ширины площадки притупления асимметричного зуба;

- зубья шарошек, работающих в режиме пробуксовки или подтормаживания, могут выполняться с прямолинейными передней и задней гранями по отношению к направлению проскальзывания вооружения либо с криволинейными аналогичными поверхностями, при этом радиус закругления  $r_1$  передней по отношению к направлению проскальзывания вооружения грани асимметричного зуба определяется по формуле

$$r_1 = \frac{L}{2 \sin 2\varphi_1 \cos \gamma} \quad (6.1)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{L}{2k_1 \cos \gamma}, \quad (6.2)$$

где

$L$  - высота асимметричного зуба;

$k_1 = (1-10)$  мм - кратчайшее расстояние между вершиной дуги с радиусом  $r_1$  и хордой, образованной пересечением этой дуги с прямолинейной поверхностью передней грани в верхней и нижней ее точках;

$\varphi_1$  - угол между линией, соединяющей вершину дуги радиусом  $r_1$  с точкой пересечения этой дуги с прямолинейной поверхностью передней грани в верхней ее точке и линией, соединяющей эту же вершину дуги с серединой хорды;

а радиус закругления  $r_2$  задней по отношению к направлению проскальзывания вооружения грани асимметричного зуба определяется по формуле

$$r_2 = \frac{L}{2 \sin 2\varphi_2 \cos(\beta - \gamma)}; \quad (6.3)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{L}{2k_2 \cos(\beta - \gamma)}, \quad (6.4)$$

где

$k_2 = (1-10)$  мм - кратчайшее расстояние между вершиной дуги с радиусом  $r_2$  и хордой, образованной пересечением этой дуги с прямолинейной поверхностью задней грани в верхней и нижней ее точках;

$\varphi_2$  - угол между линией, соединяющей вершину дуги радиусом  $r_2$  с точкой пересечения этой дуги с прямолинейной поверхностью передней грани в верхней ее точке, и линией, соединяющей эту же вершину дуги с серединой хорды;

$\beta$  - угол заострения асимметричного зуба.

На (рисунок 6.3) представлен общий вид секции шарошечного долота с продольным разрезом; на (рисунок 6.7) – траектория движения зуба ведомого венца в процессе лункообразования в поверхности забоя при пробуксовке вооружения; на (рисунок 6.8) - варианты исполнения асимметричного вооружения предложенной конфигурации зубьев, работающих в режиме проскальзывания (рисунок 6.6.1) и (рисунок 6.6.2) сечение соответственно  $A-A$  и  $B-B$  на (рисунок 6.3).

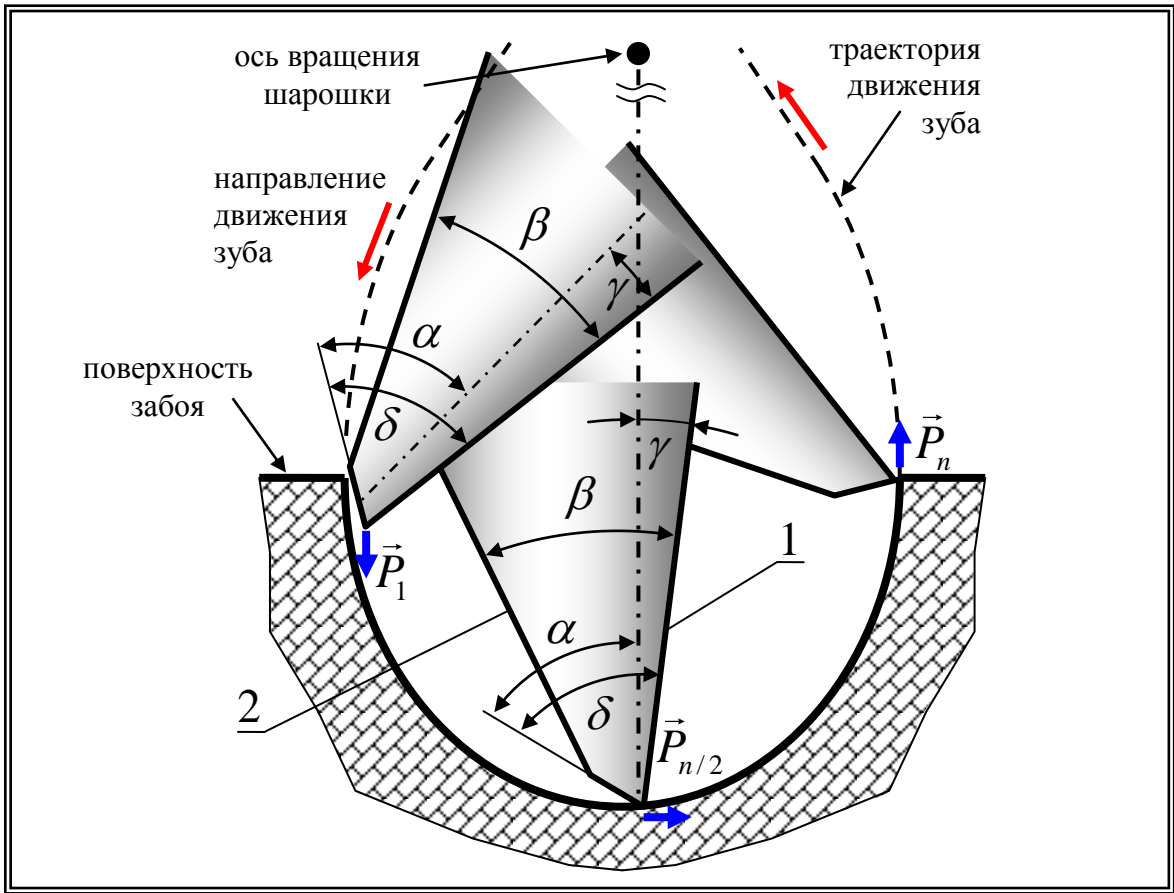


Рисунок 6.7 - Траектория движения зуба ведомого венца в процессе лункообразования в поверхности заоя при пробуксовке вооружения

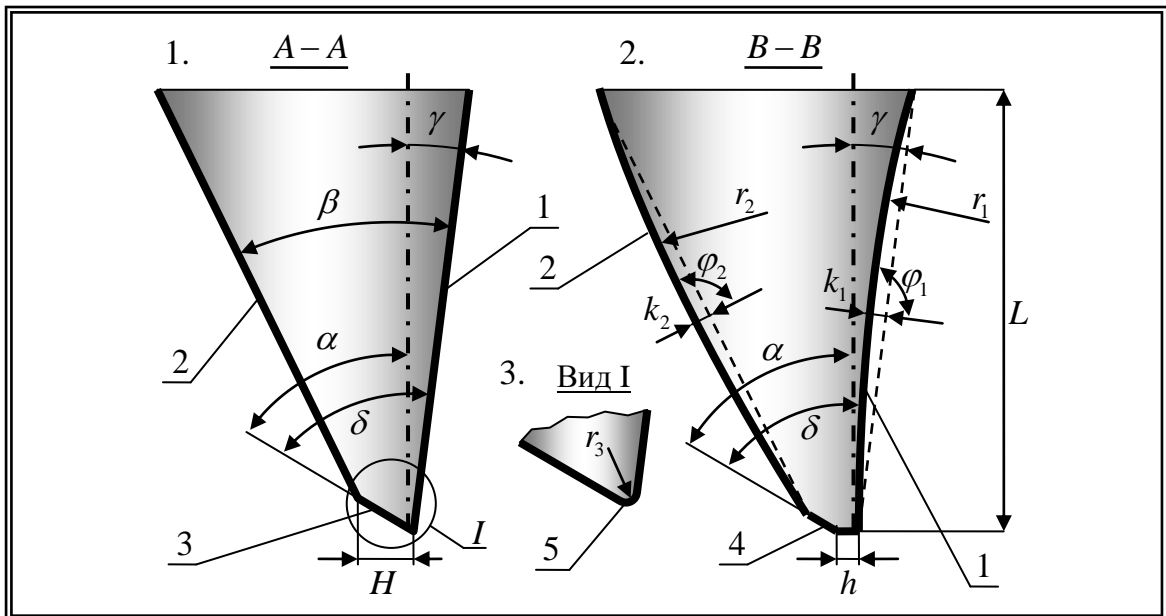


Рисунок 6.8 - Варианты исполнения асимметричного зубчатого вооружения

- 1 - с прямолинейными передней, задней гранями и наклонной площадкой притупления зуба;  
 2 - с криволинейными передней, задней гранями и ступенчатой площадкой притупления зуба;  
 3 - со сферической рабочей частью

где

$\gamma$  - угол между передней (по отношению к направлению проскальзывания вооружения) гранью зуба и линией, соединяющей вершину зуба с осью вращения шарошки в сечении, перпендикулярном образующей шарошки, град.;

$\alpha$  - угол между линией, соединяющей вершину зуба с осью вращения шарошки и поверхностью площадки притупления (или ее наклонной части) в сечении, перпендикулярном образующей шарошки, град.;

$\beta$  - угол заострения асимметричного зуба, град.;

$\delta$  - угол заострения вершинной части асимметричного зуба град.;

$h$  - ширина перпендикулярной по отношению к линии, соединяющей вершину зуба с осью вращения шарошки, части площадки притупления в сечении, перпендикулярном образующей шарошки, мм.;

$H$  - общая ширина площадки притупления зуба, мм;

$L$  - высота асимметричного зуба, мм;

$r_1$  - радиус скругления передней (по отношению к направлению проскальзывания вооружения) грани асимметричного зуба, мм;

$r_2$  - радиус скругления задней (по отношению к направлению проскальзывания вооружения) грани асимметричного зуба, мм.

Такая конфигурация зубьев позволяет значительно снизить усилие, необходимое на преодоление сопротивления породы при внедрении в нее элементов вооружения,двигающихся в пространстве по сложной траектории, за счет оптимизации угла заострения вершинной части зуба по отношению к направлению его движения, особенно при входе в породу (рисунок 6.7). В свою очередь, это также способствует большему заглублению зубьев вооружения в поверхность забоя, что позволяет увеличить основные показатели бурения, такие как механическая скорость и проходка на инструмент, в особенности при бурении средних пород. Помимо этого придание передней по отношению к направлению проскальзывания вооружения грани зуба 1 более вертикальной или ковшеобразной поверхности (рисунок 6.7, 6.8) будет способствовать лучшей производительности механического удаления шлама из лунок, образуемых в поверхности забоя зубьями вооружения [52, 78].

При этом площадка притупления зубьев в сечении, перпендикулярном образующей шарошки, может быть выполнена со скосом 3 по всей длине рабочей части зуба (рисунок 6.6.1), либо в виде ломаной линии 4 (рисунок 6.6.2), или в виде части сферы 5 с радиусом  $r_3$  (рисунок 6.6.3). При выполнении площадки притупления в виде ломаной поверхности ширина площадки  $h$ , перпендикулярной по отношению к линии, соединяющей вершину зуба с осью вращения

шарошки, составляет  $(0,25 \div 0,5)H$  общей ширины площадки притупления асимметричного зуба.

Форма рабочих частей зубьев вооружения в основном определяется физико-механическими характеристиками разрушаемых ими пород и типоразмером ШБИ. Зубья с площадками притупления со скосом 3 по всей длине наиболее целесообразно применять при бурении по мягким породам. Зубья с площадками притупления в виде ломаной линии 4 лучше использовать при бурении пород средней твердости, разрушение которых, благодаря созданию дополнительных площадок обнажения, достигается с меньшими энергетическими затратами. Зубья с закругленной формой рабочей части 5 с радиусом  $r_3$  целесообразно использовать при бурении средних и в особенности твердых пород.

Принцип работы инструмента, сводится к следующему. Под действием крутящего момента и осевой нагрузки зубья вооружения шарошек осуществляют внедрение в породу и тем самым разрушают её. Однако зубья ведущих венцов, работающие без скольжения, разрушают породу раздавливанием (скалыванием), а вершинные и периферийные венцы совершают сложное движение – перекачивание со скольжением, причем направление скольжения этих венцов противоположно. При работе венцов шарошки в режиме пробуксовки или подтормаживания задняя грань 2 зуба практически не контактирует со стенкой образуемой им лунки и в сочетании с уменьшенным углом заострения обеспечивает резкое снижение необходимого крутящего момента и осевой нагрузки на долото, а следовательно, и значительное уменьшение энергоёмкости процесса разрушения породы.

Предложенная конфигурация рабочей части зубьев может быть использована не только у долот со стальным армированным вооружением, но и в долотах с зубьями, выполненными из различных твердых сплавов.

Таким образом, применение разработанной новой конструктивной схемы исполнения зубчатого вооружения ШБИ благодаря более рациональной геометрии вооружения венцов, работающих в режиме пробуксовки или подтормаживания, даст возможность увеличить проходку и механическую скорость бурения и, как следствие, снизить стоимость проведения буровых работ.

#### **6.4 Совершенствование конструкций вооружения шарошечного бурового инструмента с целью минимизации эффекта рейкообразования**

В процессе бурения нефтегазовых скважин ШБИ довольно часто возникает проблема образования зубчатой рейки на поверхности забоя, которая оказывает отрицательное влияние на основные показатели этого процесса, то есть механическую скорость бурения и проходку на

инструмент. Суть проблемы состоит в том, что спустя некоторое время с начала работы ШБИ зубья его вооружения в процессе разрушения породы забоя формируют на нем шероховатую поверхность, обратную геометрии зубчатого вооружения ШБИ. В результате, вместо дальнейшего успешного разбуривания породы зубчатым вооружением ШБИ его шарошки осуществляют перекатывание по ответной зубчатой рейке, сформировавшейся на поверхности забоя, как шестерни механических зубчатых передач. При этом, как правило, происходит интенсивное изнашивание сбегających или набегающих рабочих граней зубчатого вооружения, а также тела шарошки, расположенного в межзубном пространстве ее вооружения. Формирование зубчатой рейки на поверхности забоя может начинаться как на начальной стадии приработки ШБИ, так и по истечении достаточно продолжительного времени бурения и связано с влиянием множества различных факторов. В подавляющем большинстве случаев образование забойной рейки в начале приводит к значительному уменьшению механической скорости бурения и в конечном итоге к полному отсутствию проходки как таковой.

Одними из основных причин появления эффекта рейкообразования на забое являются резкий переход от бурения хрупких пород к разбуриванию более пластичных; существенное превышение гидростатического давления над давлением горных пород; недостаточно совершенная геометрия зубчатого вооружения ШБИ и так далее. Поэтому во многих случаях для того, чтобы избежать формирования зубчатой рейки на забое при прохождении проблемных участков скважины, используют ШБИ для бурения более мягких пород и по возможности снижают величину гидростатического давления [22, 110].

Как правило, главными признаками, свидетельствующими об образовании на забое зубчатой рейки, являются существенное уменьшение механической скорости бурения и проходки на инструмент при неизменных режимах проведения данного технологического процесса. Это вынуждает к осуществлению незапланированной смены во многих случаях вполне еще работоспособного ШБИ на новый инструмент, имеющий существенные отличия своей геометрии зубчатого вооружения от предыдущего. В свою очередь, это требует выполнения спускоподъемных операций, проведение которых существенно увеличивает общее время проводки скважины и стоимость бурения в целом.

Поэтому работы, направленные на разработку и создание новых конструкций зубчатого вооружения ШБИ, обеспечивающего работу инструмента без вероятности образования ответной зубчатой рейки на поверхности забоя в течение всего времени работы ШБИ, все еще остаются достаточно актуальными.

Для успешного противодействия проявлению нежелательного эффекта рейкообразования по возможности нужно четко и ясно понимать условия и характер взаимодействия зубчатого вооружения ШБИ с забоем с целью определения факторов, способствующих появлению это-

го негативного явления. Многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями кинематики шарошек, а также работами по изучению износа зубчатого вооружения ШБИ, отработанного в промышленных условиях, были установлены наиболее существенные закономерности процесса рейкообразования, а также сформулированы основные пути его недопущения. Установлено, что, как правило, в процессе бурения средних и в особенности твердых пород зубчатое вооружение периферийных или ведущих венцов шарошек ШБИ формирует на поверхности забоя рейку, устойчивую к механическому воздействию зубьев всех шарошек. В связи с этим происходят существенные изменения в кинематике каждой из шарошек ШБИ, а также условий взаимодействия их зубчатого вооружения с породой забоя, так как именно периферийные или ведущие венцы главным образом определяют законы движения шарошек бурового инструмента. Прежде всего, это связано с тем, что основными поверхностями, воздействующими на породу забоя, становятся не вершинные части зубьев вооружения, а их боковые грани и межзубные впадины. В этих условиях, по мере приработки зубчатого вооружения шарошек к забойной рейке, происходит существенное уменьшение удельного давления, создаваемого зубчатым вооружением ведущих венцов на разрушаемую породу, что приводит к быстрому снижению эффективности разрушения забоя. Зубчатое вооружение шарошек ШБИ как бы зависает на ответных выступах забойной рейки. Это неминуемо приводит к существенному снижению как механической скорости бурения, так и проходки на инструмент.

В связи с этим, при создании ШБИ с КЗВ, необходимо уделить особое внимание конструктивным элементам, позволяющим исключить даже минимальную возможность образования забойной рейки в течение всего времени работы инструмента.

Первым конструктивным решением является одновременное использование разнонаправленного вооружения ведущих венцов всех трех шарошек (рисунок 6.9.2). К примеру, 1-я шарошка, имеет ПЗВ или КЗВ с незначительным углом наклона зубьев в какую либо сторону. При этом 2-я шарошка оснащена КЗВ с правым углом подъема винтовой линии, площадок притупления зубьев. В свою очередь 3-я шарошка оснащена КЗВ с левым углом подъема винтовой линии площадок притупления зубьев. Тогда в случае попадания разноориентированных зубьев вооружения след в след будет осуществляться разрушение речной поверхности забоя, создаваемой вооружением каждой предшествующей шарошки. Помимо этого разнонаправленные зубья создают на поверхности забоя большое количество несвязанных выступов, сдвинуть которые в свободное пространство между выступами легче в 8 - 10 раз. При этом зубья начинают работать в более щадящем режиме. Также рекомендуется использовать асимметричные зубья с различными направлениями и величинами асимметрии для каждой из шарошек (рисунок 6.10).

Вторым конструктивным решением является использование различных шагов зубчатого вооружения ШБИ на ведущих венцах каждой из шарошек. При этом должно соблюдаться



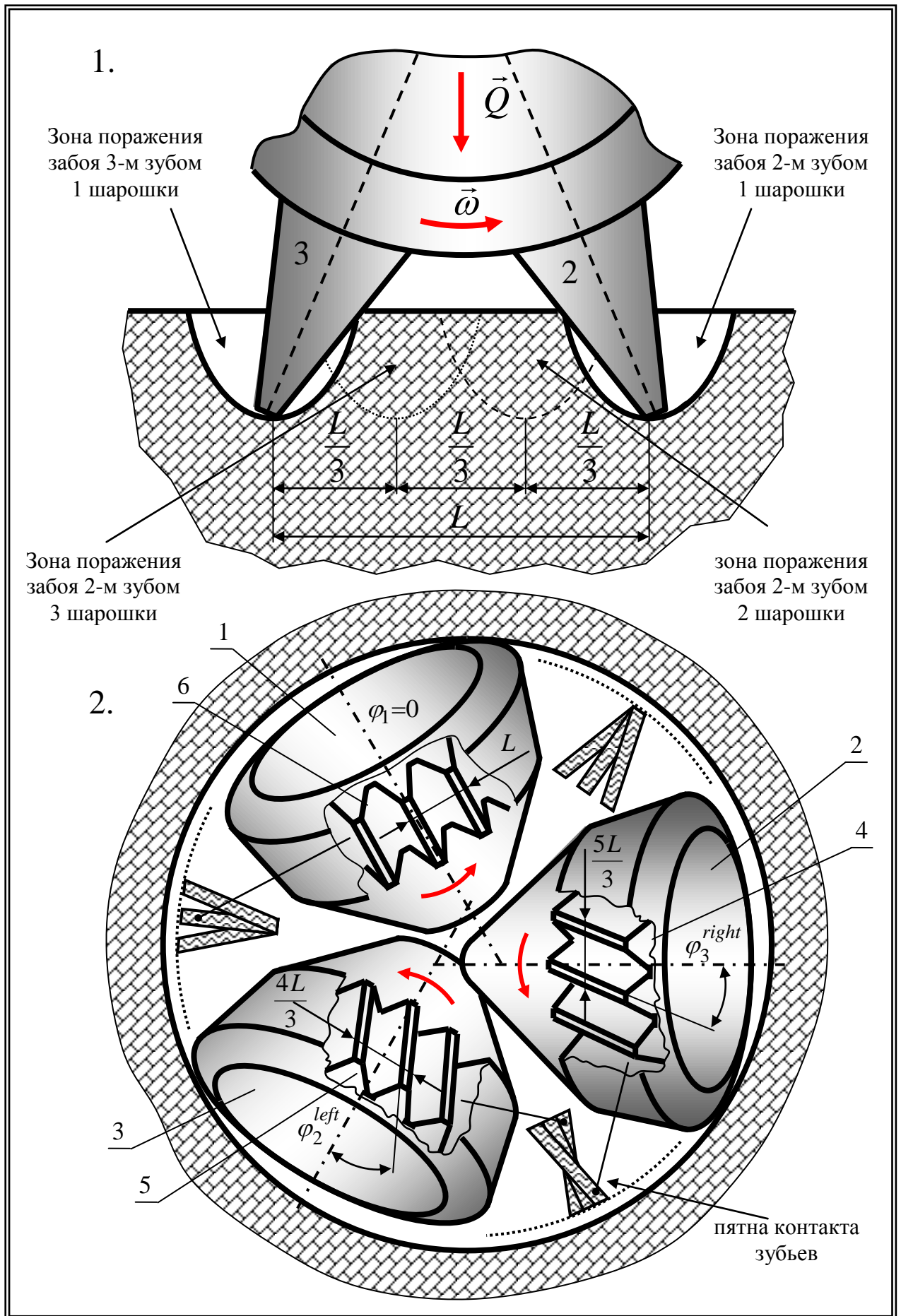


Рисунок 6.9 - Схема поражения поверхности забора разноориентированным КЗВ

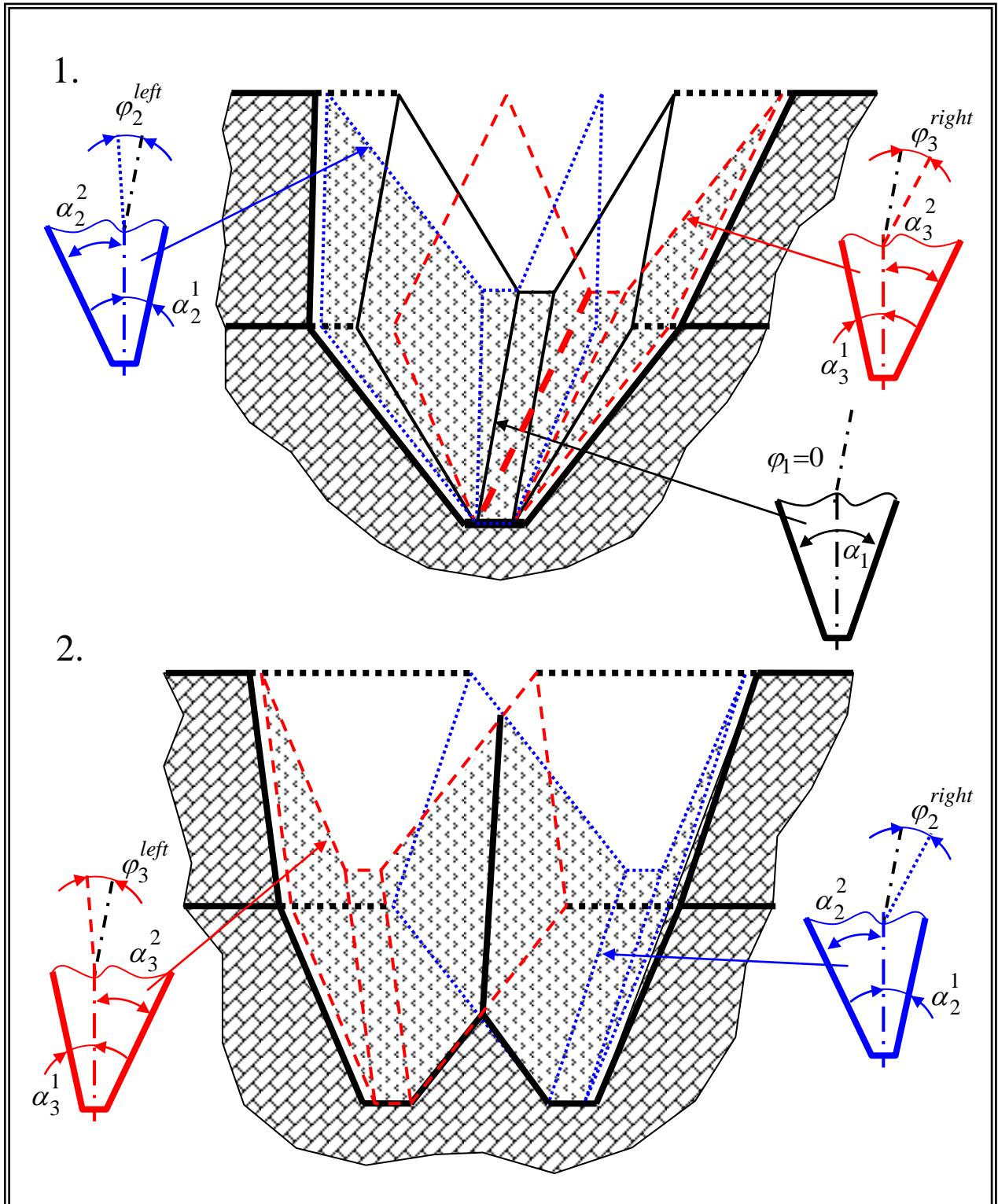


Рисунок 6.10 - Варианты поражения поверхности забоя разноориентированным КЗВ  
 1 - Попадание «зуб в зуб» трех асимметричных разнонаправленных зубьев; 2 – Схема формирования двух смежных лунок разнонаправленными зубьями двух шарошек

следующее условие шаг зубьев вооружения каждой следующей шарошки ШБИ должен превышать шаг предыдущей приблизительно на одну треть шага зубьев вооружения 1-й шарошки (рисунок 6.9.1). Только в этом случае осуществляется необходимое измельчение речной поверхности и качественное выравнивание забоя [135].

Третьим конструктивным решением является использование кинематических характеристик ведущих венцов зубчатого вооружения шарошек для исключения возможности образования забойной рейки в течение всего времени работы ШБИ.

В связи с этим, подробно рассмотрим кинематику отдельной шарошки ШБИ [104].

Сначала вычислим время, в которое зуб вооружения шарошки будет находиться в соприкосновении с породой забоя (пункт 2.3):

$$z = BM \cos(\omega_1 t) \sin \beta + AB \sin(90^\circ - \beta). \quad (6.5)$$

Происходить это будет, когда  $\cos(\omega_1 t) = -1$ , а в связи с тем, что остальные величины постоянны, то

$$\omega_1 t = \pi(2n+1) \Rightarrow t = \frac{\pi(2n+1)}{\omega_1}. \quad (6.6)$$

При перемещении оси вращения шарошки вокруг оси вращения ШБИ на

$$\varphi_2 = \omega_2 t = \omega_2 \frac{\pi(2n+1)}{\omega_1}. \quad (6.7)$$

при этом  $i = \frac{\omega_1}{\omega_2}$ ;

Следовательно

$$\varphi_2 = \frac{\pi(2n+1)}{i}, \quad (6.8)$$

где

$n$  – целые числа (0, 1, 2, 3 ...).

Поэтому координаты точки соприкосновения (взаимодействия) зуба вооружения ШБИ с забоем зависят исключительно от передаточного отношения -  $i$ .

Изучим особенности передаточного отношения пары «ШБИ-шарошка».

$$\varphi_2 = \frac{\pi(2n+1)}{i}; \varphi_2 = \frac{\pi}{i}; \frac{3\pi}{i}; \frac{5\pi}{i}; \dots \quad (6.9)$$

Предположим, что при следующем обороте ШБИ зуб его вооружения снова попадает в точку, где он был при предыдущем обороте:

$$\frac{\pi}{i} = \frac{\pi(2n+1)}{i} - 2\pi; \quad (6.10)$$

$$\frac{1}{i} = \frac{2n+1-2i}{i}; \quad (6.11)$$

$$n = i. \quad (6.12)$$

В случае, когда  $i$  принимает только целые значения, зуб вооружения при следующем обороте ШБИ будет воздействовать на то же место забоя, что и на предыдущем обороте.

Теперь рассмотрим случай, когда зуб вооружения шарошки при следующем обороте ШБИ будет воздействовать на место забоя, которое имеет смещение на одну треть расстояния между соседними последовательными попаданиями, произведенными на первом обороте:

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{i}; \frac{3\pi}{i}; \dots \quad (6.13)$$

$$\frac{5\pi}{3i} = \frac{\pi(2n+1)}{i} - 2\pi. \quad (6.14)$$

$$i = \frac{3n-1}{3}. \quad (6.15)$$

$i$  – принимает значение - 1,666. Изучим процесс повторения цикла. Допустим, что он осуществляется через каждые  $N$  оборотов ШБИ, тогда

$$\frac{\pi}{i} = \frac{\pi(2n+1)}{i} - 2\pi N; \quad (6.16)$$

$$i = \frac{n}{N}, \quad (6.17)$$

это и является условием, при выполнении которого отдельно взятый зуб вооружения шарошки попадает в лунку, им же сформированную при первом обороте ШБИ. Результаты исследования процесса «повторного попадания» одного и того же зуба вооружения ШБИ представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Результаты исследования процесса «повторного попадания» одного и того же зуба вооружения ШБИ в зависимости от разных значений величин  $i$  и  $N$

N=1	i=1	N=2	i=1,5	N=3	i=1,333	N=4	i=1,25	N=5	i=1,2
	i=2		i=2		i=1,667		i=1,5		i=1,4
	i=3		i=2,5				i=1,75		i=1,6
	i=4								i=1,8

Проведенное математическое моделирование процесса позволило установить, что зуб вооружения в зависимости от передаточного отношения может осуществлять два, три и более попаданий в свой же собственный след при одном или нескольких оборотах ШБИ в течение

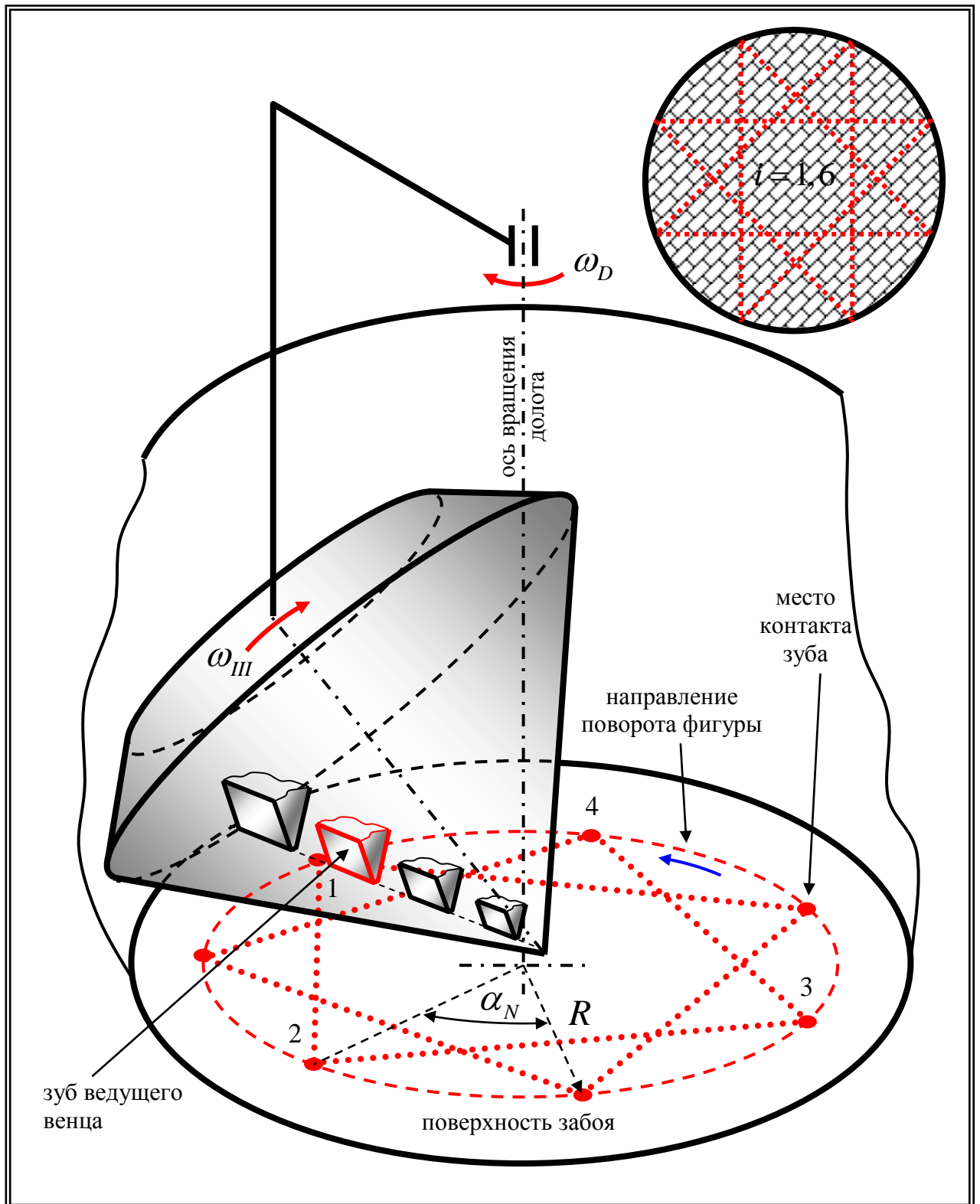


Рисунок 6.11 - Схема контактирования зуба ведущего венца  
вооружения ШБИ с забоем

всего времени работы инструмента. То есть отдельно взятый зуб вооружения ШБИ формирует в поверхности забоя лунки и в дальнейшем в течение всего процесса бурения обрабатывает исключительно их. На (рисунках 6.11) представлены схемы контактирования отдельного зуба вооружения с поверхностью забоя скважины, представляющие собой многоугольники с различным количеством вершин. При задании смещения попаданий зуба вооружения на одну треть величины расстояния между двумя соседними воздействиями на 1-ом обороте ШБИ

$$i = \frac{3n-1}{3}; \quad I = 1,667, \quad (6.18)$$

получаем эффект вращения многоугольника «попаданий» после каждого полного оборота ШБИ на угол, определяемый как:

$$\alpha_N = \frac{360}{iN}, \quad (6.19)$$

где

$N$  - полные обороты ШБИ.

В результате проведенных исследований были установлены диапазоны передаточных отношений системы «ШБИ - шарошка», в рамках которых каждый отдельно взятый зуб вооружения ведущих венцов шарошек взаимодействует с поверхностью забоя в «точках», представляющих собой вершины многоугольника, который «поворачивается» на определенный угол при каждом следующем обороте ШБИ:

$$[1, 21; 1, 24] \cup [1, 26; 1, 32] \cup [1, 33; 1, 39] \cup [1, 41; 1, 49] \cup [1, 51; 1, 59] \cup [1, 61; 1, 66] \cup [1, 68; 1, 74] \cup [1, 76; 1, 79]$$

На основе полученных теоретических результатов была создана новая геометрии зубчатого вооружения шарошек, дающая возможность повысить эффективность работы ШБИ за счет ее способности более интенсивно и качественно разрушать породу забоя, одновременно препятствуя образованию забойной рейки.

Суть разработки заключается в том, что шарошки ШБИ оснащены разноориентированным КЗВ. При этом венцы, имеющие общие обрабатываемые поверхности забоя с аналогичными венцами смежных шарошек, оснащены наклонными зубьями, имеющими различные направления их наклона по отношению к оси вращения шарошки. Однако в рамках одного венца для каждой из шарошек КЗВ имеет одинаковую направленность. Также, минимум один ведущий венец, какой либо шарошки должен обеспечивать передаточное отношение к скорости вращения ШБИ, укладываемое в ранее указанные диапазоны. В дополнение к этому:

- шаги зубьев у ведущих венцов, которые имеют общие обрабатываемые поверхности забоя с аналогичными венцами смежных шарошек, имеют следующие соотношения: шаг зубьев ведущего венца 2-й шарошки превышает шаг зубьев венца 1-й на 30 – 35 %, а шаг зубьев ведущего венца 3-й шарошки превышает шаг зубьев ведущего венца 1-й на 65 – 70 %;

- зубья вооружения шарошек имеют асимметричную форму, при этом на каждой следующей шарошке асимметрия выполняется в строго противоположном направлении.

Схема поражения забоя разноориентированным зубчатым вооружением представлена на (рисунок 6.9), а варианты воздействия разноориентированного зубчатого вооружения на поверхность забоя на (рисунок 6.10).

ШБИ содержит шарошки 1, 2, 3, которые оснащены разноориентированным зубчатым вооружением, ведущие венцы которого, имеющие общие обрабатываемые поверхности забоя с аналогичными венцами смежных шарошек, оснащены наклонными зубьями 4, 5, 6, имеющими различные направления их наклона по отношению к оси вращения шарошки. На (рисунок 6.9.2) представлен пример геометрии зубчатого вооружения ШБИ, где шарошки 2 и 3 оснащены наклонными зубьями 4 и 5, разноориентированными по отношению к осям вращения каждой из шарошек, а третья шарошка 1 оснащена ПЗВ 6. При этом шаги зубьев у ведущих венцов, которые имеют общие обрабатываемые поверхности забоя с аналогичными венцами смежных шарошек, имеют следующие соотношения: шаг зубьев ведущего венца 2-й шарошки превышает шаг зубьев венца 1-й на 30 – 35 %, а шаг зубьев ведущего венца 3-й шарошки превышает шаг зубьев ведущего венца 1-й на 65 – 70 %; Новая геометрия вооружения шарошек предусматривает, что все зубья в пределах одного ведущего венца имеют одинаковую ориентацию, но отличную от аналогичных венцов смежных шарошек. Данное конструктивное решение дает возможность формировать зубья вооружения шарошек с минимальными производственными затратами. При этом как минимум один ведущий венец какой-либо шарошки 1, 2 или 3 должен обеспечивать передаточное отношение к скорости вращения ШБИ, укладываемое в ранее указанные диапазоны.

Принцип работы инструмента сводится к следующему. Под действием крутящего момента и осевой нагрузки зубья вооружения шарошек 1, 2 и 3 осуществляют внедрение в породу и тем самым разрушают её. Выполнение ШБИ с шарошками, оснащенными зубьями, расположенными под различными углами по отношению к каждой из осей соответствующей шарошки, обеспечивает повышение эффективности работы инструмента за счет способности его вооружения более интенсивно разрушать породу и выравнивать поверхность забоя, одновременно препятствуя образованию забойной рейки. В то же время формирование зубчатого вооружения в пределах одного ведущего венца на каждой из шарошек с одинаковой угловой ориентацией зубьев практически не усложняет технологию изготовления шарошек по сравнению с серийными аналогами, оснащенными ПЗВ.

Таким образом, применение новой геометрии зубчатого разноориентированного вооружения в ШБИ даст возможность повысить эффективность работы инструмента за счет обеспечения более качественного выравнивания забоя и минимизирования вероятности проявления

эффекта рейкообразования в течение всего процесса бурения. Все это в конечном итоге позволит увеличить проходку на инструмент и механическую скорость бурения и одновременно снизить стоимость проведения буровых работ.

Дальнейшим развитием исследований связанных с созданием перспективных конструкций зубчатого вооружения ШБИ, способных более эффективно разрушать поверхность забоя, одновременно препятствуя образованию забойной рейки, являются еще два варианта конструктивного решения этой проблемы.

Первый вариант конструкции, заключается в том, что шарошка ШБИ [59], состоящая из конусообразного корпуса 1 (рисунок 6.12.1), калибрующий или периферийный венец 2 которого оснащен литыми или фрезерованными зубьями 3, 4, и 5, определенным образом сориентированными под различными углами относительно образующей 6 корпуса 1. Так, зубья 3 находящиеся на венце 2, через зуб сориентированы вдоль образующей 6 корпуса, в то время как соседние зубья 4 и 5 развернуты в противоположные друг другу стороны на угол  $\alpha$  по отношению к образующей 6 корпуса шарошки [69].

Величина угла  $\alpha$  наклона зубьев 4 и 5 зависит от физико-механических характеристик разбуриваемых пород, и находится в диапазоне равном  $5^0$ - $15^0$ . Большие значения угла наклона  $\alpha$  требуются для разрушения более твердых пород, а меньшие значения - для мягких. Абсолютно все зубья 3, 4, и 5 по внутреннему торцу венца 2 распределены с одинаковым шагом  $t$ , в то время как со стороны внешнего торца венца, величина шага  $t_1$  между зубьями 3 и 4 составляет

$$t_1 = t + l \sin \alpha ; \quad (6.20)$$

в свою очередь шаг  $t_2$  между зубьями 3 и 5 определяется как

$$t_2 = t - l \sin \alpha , \quad (6.21)$$

где

$l$  - длина площадки притупления зуба 3, мм.

Принцип работы шарошки с новой геометрией зубчатого вооружения заключается в следующем. Под действием крутящего момента и осевой нагрузки зубья вооружения шарошек 3, 4 и 5 осуществляют внедрение в породу и дальнейшее ее разрушение. При этом зубья 3, сориентированные вдоль образующей 6 корпуса 1 и создающие максимальные удельные давления на породу, накатывают на поверхности забоя «зубчатую рейку», которая тут же разрушается зубьями 4 и 5. Повышенная эффективность разрушения «зубчатой рейки» обеспечивается за счет наклона зубьев 4 и 5 в различные стороны (рисунок 6.12.1), которое исключает сто процентное попадание «след в след» зубьев 3, 4, и 5 [59].



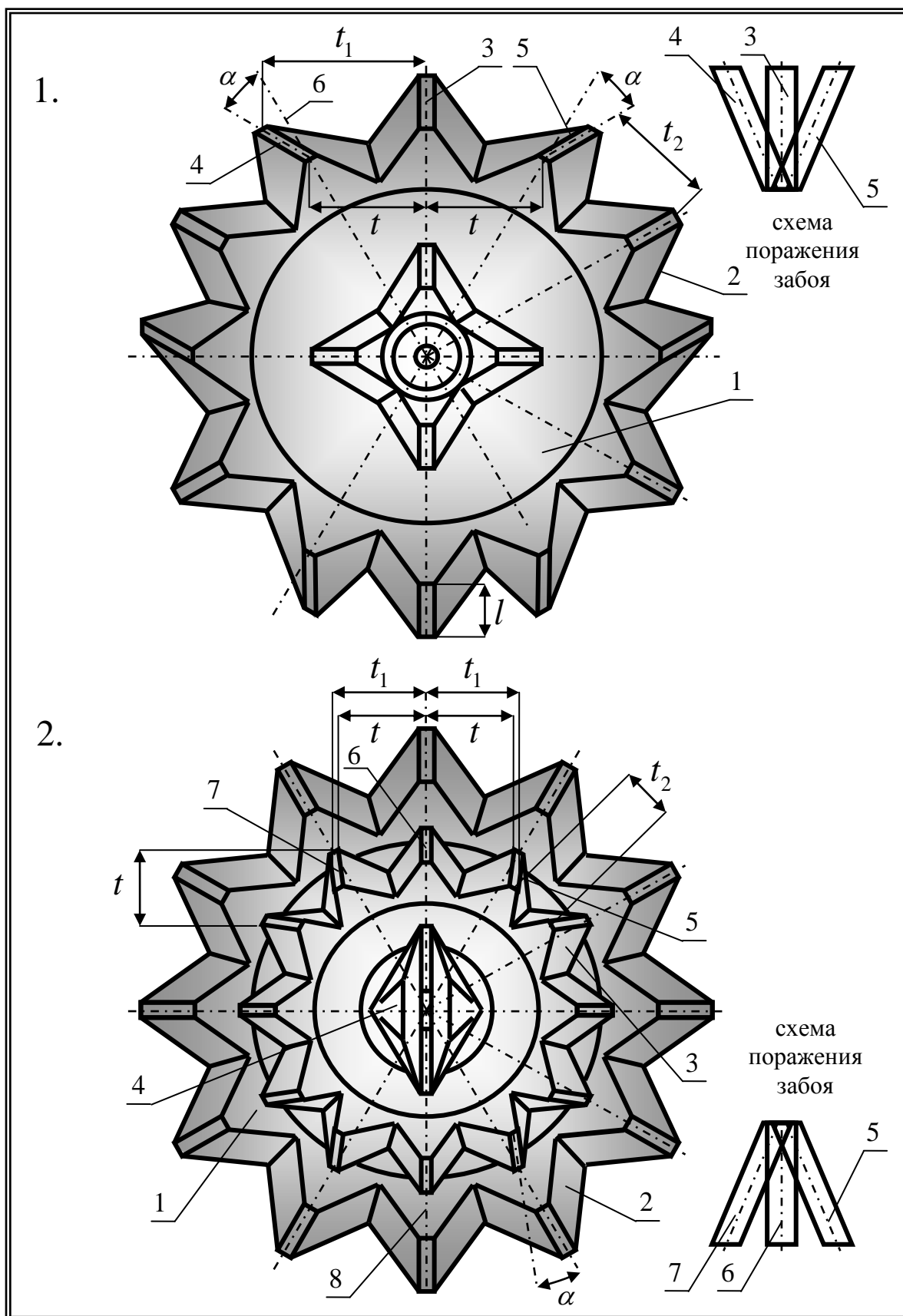


Рисунок 6.12 - Варианты геометрии вооружения шарошек

1 - ведущий венец; 2 - ведомый венец

Таким образом, оснащение шарошек зубчатым разноориентированным вооружением новой геометрии даст возможность повысить эффективность работы ШБИ за счет обеспечения более качественного выравнивания забоя и минимизирования вероятности проявления эффекта рейкообразования в течение всего процесса бурения.

Известно, что при работе ШБИ, оснащенного самоочищающимся зубчатым вооружением, наибольшую нагрузку принимает на себя венец, который ближе всего расположен к калибрующему или периферийному венцу шарошки. Например, периферийная область забоя у ШБИ, оснащенного тремя шарошками, подвергается трехкратному перекрытию и дальнейшее усиление вооружения, обрабатывающего эту область, не сможет кардинально повысить эффективность работы ШБИ. В то же время венец основного конуса шарошки, расположенный наиболее близко к периферийному или калибрующему венцу, разрушает объем горной породы сопоставимый с объемом, разрушаемым периферийным венцом, и, следовательно, воспринимает трехкратную нагрузку. Именно это обстоятельство объясняет «облысение», то есть более интенсивное изнашивание зубчатого вооружения, расположенного на основных конусах шарошек.

С целью решения этой проблемы была разработана новая геометрия разноориентированного зубчатого вооружения шарошек (второй вариант), обеспечивающая не только эффективное предотвращение возникновения эффекта рейкообразования, но и снижение энергоемкости процесса разрушения проблемных областей забоя, расположенных в непосредственной близости от зон, обрабатываемых периферийными венцами шарошек [60].

Второй вариант конструкции (рисунок 6.12.2), заключается в том, что на многовенцовой шарошке ШБИ как минимум один из венцов оснащен зубчатым разноориентированным как вдоль, так и под углом к образующей шарошки вооружением, имеющим со стороны своего наружного торца одинаковый шаг зубьев, и располагающимся рядом с периферийным венцом. При этом угол наклона зубьев вооружения по отношению к образующей основного корпуса шарошки  $\alpha$  находится в пределах от 10 до 20°.

Шарошка ШБИ состоит из конусообразного корпуса 1, оснащенного несколькими зубчатыми венцами 2, 3, 4, при этом венец под номером 3, смежно расположенный с калибрующим венцом 2, оснащен стальными армированными зубьями 5, 6, 7, разноориентированными по отношению к образующей 8 корпуса шарошки 1. Зубья 6 венца 3 располагаются через каждые два зуба и ориентированы вдоль образующей 8, в то время как зубья 5 и 7, смежно расположенные с зубьями 6, ориентированы под углом  $\alpha$  к образующей 8 и развернуты в противоположные друг другу стороны. Величина угла  $\alpha$  наклона зубьев 5 и 7 зависит от физико-механических характеристик разбуриваемых пород и находится в диапазоне, равном 10°-20°. Большие значения угла наклона  $\alpha$  требуются для разрушения более твердых пород, а меньшие значения - для мягких. Абсолютно все зубья 5, 6, 7 по наружному торцу венца 3 распределены с одинаковым

шагом  $t$ , в то время как со стороны внутреннего торца венца величина шага  $t_1$  между зубьями 5 и 6 составляет:  $t_1 = t + l \sin \alpha$ , в свою очередь шаг  $t_2$  между зубьями 5 и 7 определяется как:  $t_2 = t - 2l \sin \alpha$ , где  $l$  - длина площадки притупления зуба 6.

Принцип работы шарошки с новой геометрией зубчатого вооружения заключается в следующем. Под действием крутящего момента и осевой нагрузки зубья венцов 2, 3, 4 вооружения шарошек осуществляют внедрение в породу и дальнейшее ее разрушение. При этом зубья 5, 6 и 7 венца 3, смежно расположенного с калибрующим венцом 2 шарошки, работают в более сложных условиях. Объясняется это тем, что при работе ШБИ, шарошки которого оснащены самоочищающимся зубчатым вооружением, каждая кольцевая область забоя, кроме периферийной, обрабатывается зубьями только одного венца. Кольцевая область забоя, разрушаемая венцом 3, обладает максимальной площадью в сравнении с кольцевыми областями, обрабатываемыми венцами основного конуса шарошки, и сопоставима с площадью кольцевой области забоя, обрабатываемой периферийным или калибрующим венцом. Однако если обработка периферийного кольцевого участка забоя при бурении ШБИ, оснащенном тремя шарошками, осуществляется сразу тремя венцами зубчатого вооружения, то кольцевая область забоя, смежно расположенная с этой периферийной областью, разрушается зубчатым вооружением только одного венца 3. Таким образом, загруженность венца 3 в разы больше, чем периферийного венца 2. Наибольшая нагрузка данного венца зубчатого вооружения приходится на его периферийную часть. С целью облегчения условий работы венца 3 зубья 5, 6, 7 имеют определенную ориентацию для исключения образования «зубчатой рейки» на поверхности забоя. При этом следует отметить, что при наличии на забое скважины «рейки» снижается эффективность работы не только первой шарошки долота, которая и накатывает «рейку», но и работы соседних шарошек. В шарошке с новой геометрией вооружения за счет расположения зубьев 5, 6, 7 с равномерным шагом  $t$  на внешнем торце венца 3 обеспечивается повышенная разрушающая способность зубчатого вооружения в наиболее нагруженной кольцевой области забоя, осложненной образующимися между венцами 2 и 3 «воротниками». Расположение зубьев 5 и 7 под определенным углом к образующей шарошки дает возможность успешно устранять как «забойную рейку», так и образующиеся «воротники» за счет объемного разрушения породы и образования дополнительных поверхностей обнажения, повышающих эффективность работы вооружения ШБИ.

Таким образом, оснащение ШБИ шарошками с новой геометрией зубчатого вооружения позволит увеличить механическую скорость бурения и проходку на инструмент за счет более эффективного разрушения воротников и «забойной рейки» на наиболее сложных кольцевых участках забоя.

## 6.5 Совершенствование геометрии вооружения шарошечных расширителей

Все возрастающая потребность в углеводородном сырье требует разведки и освоения все новых нефтегазовых месторождений. Однако в подавляющем большинстве случаев это приводит к необходимости увеличения объемов бурения, так как новые нефтегазоносные горизонты, как правило, залегают на больших глубинах. В свою очередь, это приводит к усложнению и утяжелению конструкций скважин и, как следствие, увеличению начальных диаметров и глубин кондукторов стволов и скважин большого диаметра. Поэтому разработка новых конструкций ШБИ и дальнейшее совершенствование уже существующих, используемых при строительстве данного типа скважин, в настоящее время является одной из приоритетных задач.

Наиболее распространенным способом формирования верхнего интервала стволов и скважин больших диаметров является бурение с образованием наружного ступенчатого забоя, формирование которого осуществляется при одновременной походке скважины в двух, трех или более плоскостях. В нижней плоскости образуется круговой центральный забой меньшего диаметра, а над ним – один, два и более периферийных кольцевых забоев. Наружно-ступенчатый забой формируется в процессе бурения специальными техническими средствами, конструктивными особенностями которых являются наличие породоразрушающих элементов, разбурывающих центральную часть забоя, и элементов, расширяющих ствол скважины. Наиболее распространенным представителем данной компоновки является одновременное использование шарошечного пилотного долота и шарошечного наддолотного расширителя (рисунок 6.13).

В настоящее время в нашей стране и за рубежом имеется большое количество конструкций расширителей шарошечного типа, которые главным образом различаются друг от друга типом вооружения, количеством шарошек и способами крепления с корпусом инструмента, то есть с несменными или сменными шарошками. Шарошечные расширители, имеющие сменные породоразрушающие элементы, являются специальными конструкциями, оснащенными шарошками, геометрия и способ крепления которых существенно отличаются от шарошек, применяемых при оснащении долот для сплошного бурения. Более того, они существенно дороже одноразовых конструкций неразборного типа.

Поэтому многочисленные буровые предприятия, в кооперации с научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими организациями разрабатывают и производят в кустарных условиях упрощенные конструкции шарошечных расширителей. Как правило, в основе таких конструкторских решений лежит возможность использования для их изготовления имеющегося у буровых предприятий стандартного бурового инструмента: бурильных головок, переводников, шарошечных долот, утяжеленных бурильных труб и так далее.

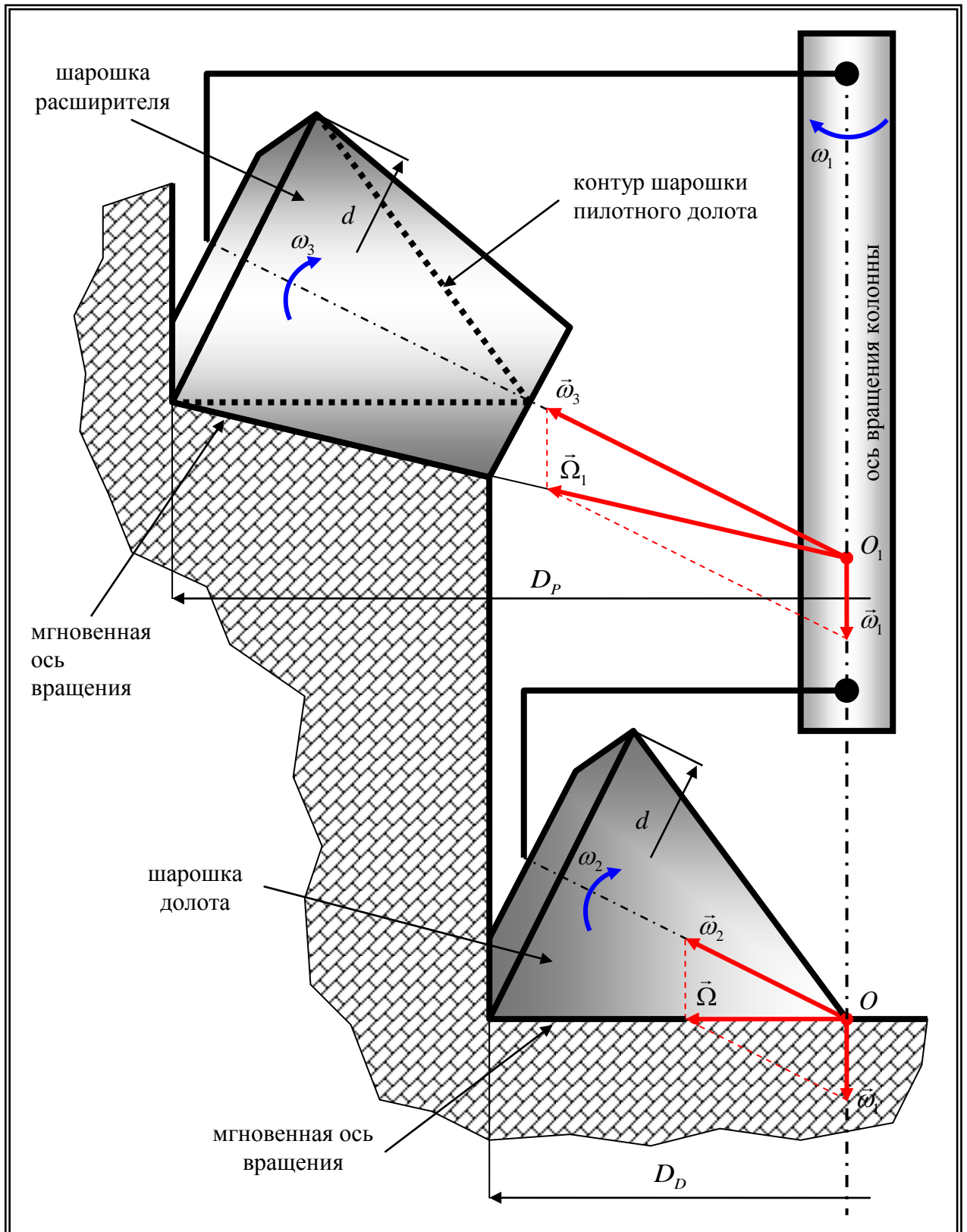


Рисунок 6.13 - Кинематическая схема работы шарошечного пилотного долота и шарошечного наддолотного расширителя

В большинстве случаев, такие конструкции расширителей включают в себя корпус, изготовленный из утяжеленных бурильных труб, и приваренные к нему секции серийных шарошечных буровых долот [18].

Тем не менее, при всей кажущейся простоте и дешевизне таких шарошечных расширителей, в процессе их проектирования и изготовления не учитывается существенное изменение кинематики шарошек, новые условия работы которых приводят к существенному несоответствию геометрии их вооружения, характеру и условиям взаимодействия зубчатого вооружения шарошечного расширителя при разрушении породы кольцевого забоя.

Рассмотрим подробнее принципы и условия работы шарошечных расширителей данного типа. К примеру, выберем компоновку низа буровой колонны, состоящую из пилотного шарошечного долота и наддолотного шарошечного расширителя, изготовленного с использованием секций аналогичного шарошечного долота (рисунок 6.13).

Частота вращения ротора при бурении с использованием наддолотного шарошечного расширителя должна быть существенно меньше, чем рекомендованная частота вращения для шарошечных долот, из секций которых он изготовлен. Это связано с тем, что скорость вращения любой шарошки значительно повышается при удалении ее от оси вращения ШБИ, то есть с увеличением диаметральных размеров инструмента. Как правило, для расчета рекомендуемой частоты вращения шарошечного расширителя используется следующее соотношение:

$$N = \frac{D_D}{D_P} n_R, \quad (6.22)$$

где

$D_D$  - диаметр ШБИ, использованного для изготовления шарошечного расширителя, мм;

$n_R$  - рекомендуемая частота вращения ШБИ, использованного для изготовления шарошечного расширителя, об/мин;

$D_P$  - диаметр шарошечного расширителя, мм.

Осевая нагрузка на шарошечный расширитель, из расчета на каждую его шарошку, не должна превышать рекомендованную нагрузку на ШБИ, из которого он был изготовлен

$$Q_P = \frac{Z}{3} Q_D, \quad (6.23)$$

где

$Z$  - количество шарошек расширителя, шт.;

$Q_D$  - рекомендованная осевая нагрузка на ШБИ, использованного для изготовления шарошечного расширителя, кН.

Количество шарошек расширителя зависит от условий бурения. При увеличении числа шарошек происходит снижение вибрации бурового снаряда и увеличивается ресурс работы шарошечного расширителя, но вместе с тем увеличивается и требуемая осевая нагрузка на буровой инструмент для успешного разрушения наружно-ступенчатого забоя.

Как отмечалось ранее, ШБИ, предназначенный для разбуривания мягких и средних пород, оснащается смещенными в плане многоконусными шарошками, отличающимися от геометрии подвижного аксоида. Эти факторы в основном и обеспечивают у данного типа ШБИ эффект проскальзывания зубчатого вооружения при «перекатывании» его шарошек по забою. При этом периферийные венцы шарошек работают с подтормаживанием вооружения, а вершинные в режиме пробуксовки [104]. Но как только те же шарошки раздвигаются на более существенное расстояние от оси ШБИ, картина значительно меняется. В большинстве случаев, периферийные венцы начинают пробуксовывать, а вершинные работать в режиме подтормаживания. Это связано с тем, что при удалении шарошек (при сохранении наклона цапфы лапы к оси вращения ШБИ) изменяется положение мгновенной оси вращения (рисунок 6.13). Где  $\omega_1$  - скорость вращения бурового инструмента;  $\omega_2$  - скорость вращения шарошки пилотного долота;  $\omega_3$  - скорость вращения шарошки наддолотного расширителя;  $d$  - диаметр калибрующего венца шарошки пилотного шарошечного долота;  $\Omega$  и  $\Omega_1$  - величины мгновенных угловых скоростей шарошек пилотного долота и наддолотного расширителя.

Это обязательно нужно учитывать при проектировании и создании шарошечных расширителей в связи с тем, что при бурении твердых пород необходимо, чтобы вся контактирующая с забоем нижняя образующая каждой из шарошек расширителя совпадала с ее мгновенной осью вращения. Только при соблюдении этого условия «перекатывания» шарошек будут осуществляться без скольжения их вооружения по забою, что при бурении твердых пород является довольно важным моментом. А при разбуривании мягких и средних пород, наоборот, нужно заведомо обеспечивать скольжение зубьев различных венцов вооружения шарошек в зависимости от формы наружно-ступенчатого забоя и конструкции самого расширителя.

Очистка бурового инструмента и всей призабойной зоны является важным фактором при проходке стволов и скважин больших диаметров в связи со значительным увеличением объемов разрушаемой породы. Например, объем шлама при бурении скважины диаметром 609 мм почти в четыре раза больше, чем при диаметре 304,8 мм. Поэтому при использовании наддолотного шарошечного расширителя желательнее заглушить один или два промывочных узла пилотного долота, чтобы перераспределять основной поток промывочного агента (жидкости) на шарошки расширителя [18].

Одним из перспективных направлений повышения эффективности очистки зоны забоя является оснащение ШБИ новыми конструкциями КЗВ. Этот тип зубчатого вооружения ШБИ позволяет превращать все без исключения венцы шарошек в мини-шнеки, которые в областях с пониженными скоростями потока промывочного агента (жидкости) механическим путем эвакуируют шлам в требуемом для каждой конкретной схемы промывки направлении [118].

Если ПЗВ разрушает породу с образованием практически ровного бурта, имеющего равносторонний отвал, то КЗВ с самого начала внедрения зуба в поверхность забоя формирует конусообразный бурт, с большим отвалом разрушенной породы в направлении наклона зубьев вооружения (рисунок 6.14). Это дает возможность не только уменьшить изгибающие нагрузки, воздействующие на зубья вооружения шарошек в процессе работы ШБИ, но и изначально задать направление перемещения шлама.

Таким образом, основными недостатками шарошечных расширителей, оснащенных секциями или шарошками от стандартных долот с ПЗВ, являются: низкие показатели работы, такие как механическая скорость бурения и проходка на инструмент вследствие значительного несоответствия геометрических параметров их зубчатого вооружения условиям бурения и характеру взаимодействия с разрушаемой породой забоя; низкая эффективность работы промывочной системы, связанной с некачественным очищением и удалением шлама с забоя скважины, приводящим к его повторному многократному измельчению зубчатым вооружением шарошек. Во многом это связано с тем, что ПЗВ шарошек не принимает участия в транспортировке шлама, в особенности из периферийных областей забоя скважины, где в большинстве случаев происходит скопление основной массы измельченной разрушенной породы.

С целью повысить эффективность работы шарошечных расширителей путем снижения энергетических затрат, необходимых для разрушения мягких и средних пород, и более качественной очистки забоя от шлама за счет облегчения его эвакуации из зоны работы инструмента и всей призабойной зоны была разработана новая конструкция шарошечного расширителя, оснащенного разноориентированным КЗВ (рисунок 6.15). Главной отличительной особенностью новой конструкции является то, что все шарошки расширителя оснащены разноориентированным КЗВ, работающим со скольжением, при этом зубья основных венцов имеют левое направление подъема винтовой линии образующих площадок притупления, а зубья периферийных наклонены прямо противоположно. При этом угол наклона патрубков с гидромониторными насадками к плоскости забоя находится в пределах от  $80^{\circ}$  до  $100^{\circ}$ .

Шарошечный расширитель состоит из полого корпуса 1 с муфтой 2, с двух сторон имеющей резьбу 3 для присоединения к колонне бурильных труб, и подсоединения пилотного наконечника 4 и системой промывки. На корпусе 1 расширителя жестко закреплены лапы 5 с



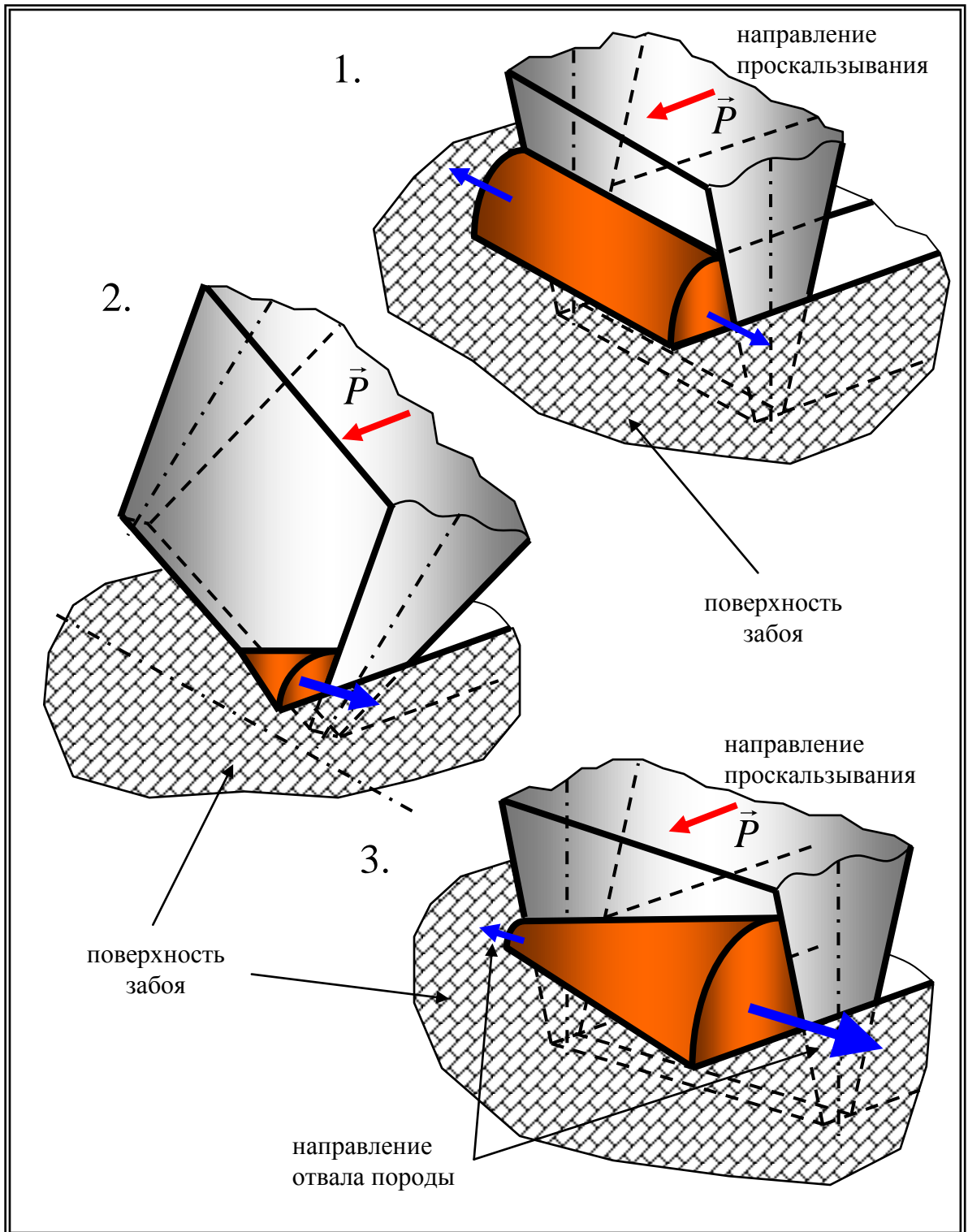


Рисунок 6.14 - Схема воздействия зубьев ШБИ на забой  
в процессе подтормаживания вооружения

1 - максимальное заглубление ПЗВ; 2 - вход в поверхность забоя КЗВ;

3 - максимальное заглубление КЗВ

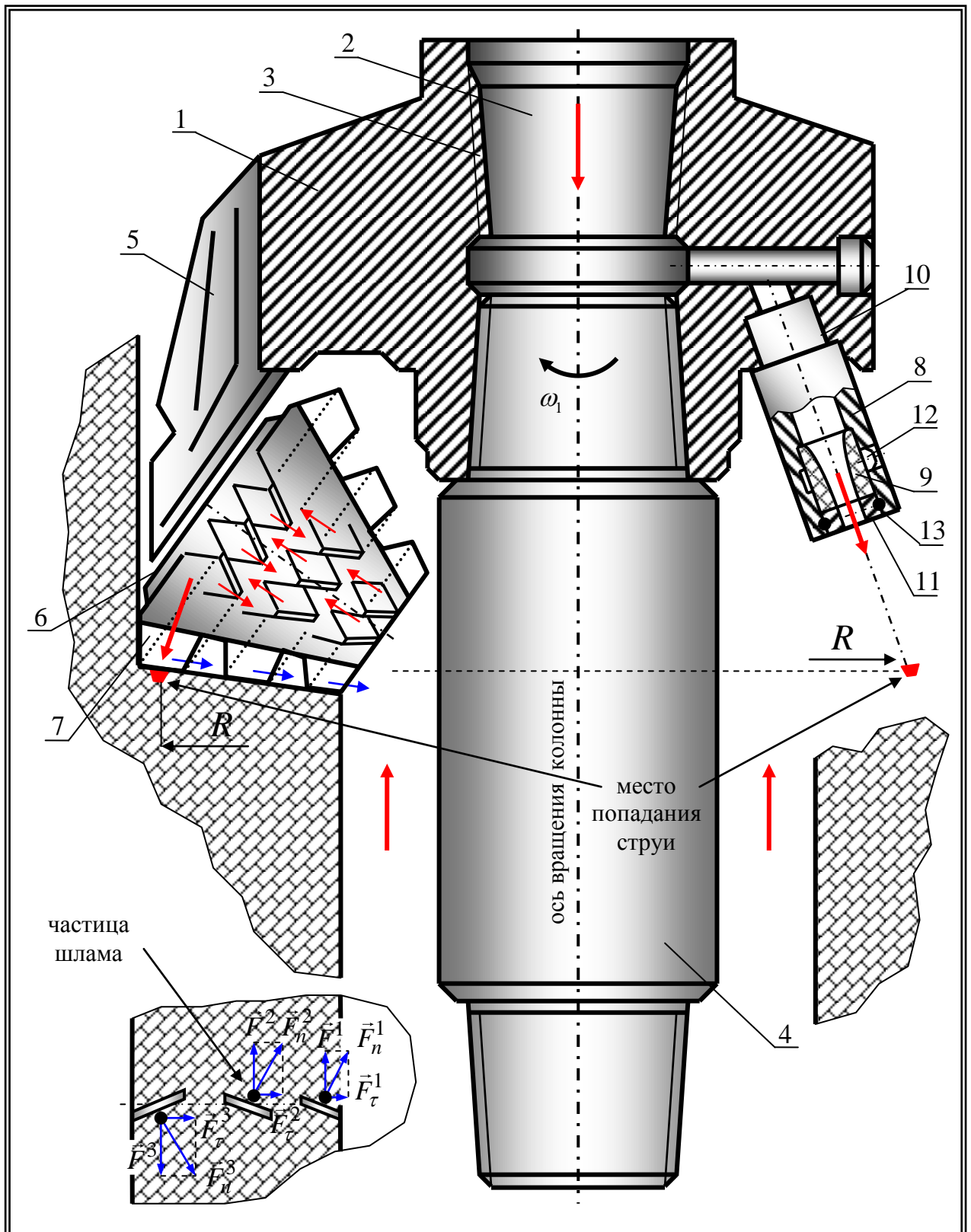


Рисунок 6.15 - Принципиальная схема шарошечного расширителя с косозубым вооружением

шарошками 6, оснащенными фрезерованным или литым КЗВ 7. В проемах между шарошками 6 вмонтированы патрубки 8 промывочной системы, с гидромониторными насадками 9, зафиксированными в каналах 10 втулками 11, которые крепятся к патрубку 8 гвоздевыми шплинтами 12 или разрезными пружинными кольцами [56, 57]. Герметизация гидромониторных насадок 9 достигается за счет использования уплотнительных колец 13. Каждая шарошка 6 расширителя оснащена разноориентированным КЗВ и имеет форму, обеспечивающую работу зубьев 7 вооружения бурового инструмента со скольжением по поверхности забоя. При этом зубья основных венцов имеют левое направление подъема винтовой линии образующих площадок притупления, а зубья периферийных наклонены прямо противоположно. Очистка зоны забоя от разрушенной породы осуществляется промывочным агентом (жидкостью), прокачиваемым сквозь гидромониторные насадки, которые направлены на поверхность забоя в зону работы периферийных или калибрующих венцов под различными углами, находящимися в пределах от  $80^{\circ}$  до  $100^{\circ}$ . Величина угла наклона гидромониторных насадок по отношению к поверхности забоя изменяется в зависимости от условий работы шарошечных расширителей [82].

Принцип работы шарошечного расширителя сводится следующему. Под действием крутящего момента и осевой нагрузки, передаваемых посредством колонны бурильных труб на корпус 1, зубья 7 шарошек 6 внедряются в поверхность кольцевого забоя и разрушают его [136]. Разрушенная порода эвакуируется промывочным агентом (жидкостью), подаваемым сквозь полость в корпусе 1 и промывочные патрубки 8 с гидромониторными насадками 6. Оснащение шарошек 6 разноориентированным КЗВ основных и периферийных (калибрующих) венцов позволяет обеспечить более качественную очистку забоя от шлама. Это обеспечивается за счет применения наклонных зубьев 7 шарошек 6 в качестве транспортирующих средств. Шарошки 6 при этом обладают геометрическими параметрами, которые обеспечивают проскальзывание зубчатого вооружения в процессе их «перекатывания» по забою. В связи с тем, что шарошки 6 разнесены от оси вращения расширителя, проскальзывание зубчатого вооружения основных и периферийных венцов шарошек происходит в противоположных направлениях по отношению к таким же венцам шарошек пилотного долота. В новой конструкции расширителя зубчатое вооружение периферийных или калибрующих венцов шарошек 6 работает в режиме пробуксовки, а вооружение основных – в режиме подтормаживания. В этом случае калибрующие или периферийные венцы шарошек 6, пробуксовывая по забою, за счет «шнекового эффекта» механически транспортируют шлам в центральную область забоя, удаляя его из проблемной зоны, образованной поверхностью забоя и стенкой скважины, где, как правило, скапливается значительное количество шлама, удаление которого сопряжено с существенными трудностями. В свою очередь зубья основных венцов шарошек 6, подтормаживая в обратном направлении, оснащены наклонными зубьями противоположной направленности, поэтому тоже транспорти-

руют разрушенную породу в центральную часть наружно-ступенчатого забоя (рисунок 6.15). Этим достигается однонаправленность между потоками промывочного агента (жидкости), исходящими из гидромониторных насадок 9, и направлением механического перемещения разрушенной породы проскальзывающим зубчатым вооружением всех без исключения венцов шарошек в центральную область наружно-ступенчатого забоя.

Одновременно с этим, в процессе прохождения КЗВ гидравлической среды, также посредством «шнекового эффекта» осуществляется перемещение шламовой взвеси основными венцами в направлении периферии забоя, а калибрующими или периферийными к центру скважины. Этим также достигается однонаправленность между потоком промывочного агента (жидкости), восходящим вверх по стволу скважины, омывающего шарошки 6 сверху и сбоку, и направлением механического перемещения разрушенной породы КЗВ основных венцов в процессе прохождения ими гидравлической среды. КЗВ периферийных или калибрующих венцов шарошек в процессе прохождения гидравлической среды перемещает шламовую взвесь в противоположном направлении. Это обеспечивает создание демпферной зоны, не позволяющей шламу из основного потока промывочного агента (жидкости) попадать в проблемные с точки зрения их очистки области работы периферийных или калибрующих венцов шарошек. После столкновения разнонаправленных потоков, созданных разноориентированным КЗВ шарошек, происходящим в межвенцовой нейтральной области, обогащенный шламом промывочный агент (жидкость) перенаправляется в свободные проемы, расположенные между лапами шарошечного расширителя, и далее в межтрубное пространство.

Таким образом, применение новой конструкции шарошечного расширителя, оснащенного более рациональной геометрией разноориентированного КЗВ, и обеспечивающей более благоприятные условия, как гидравлические, так и механические для удаления разрушенной породы с поверхности кольцевого забоя, даст возможность увеличить механическую скорость бурения и проходку на инструмент при сооружении стволов и скважин больших диаметров и, как следствие, снизить общую стоимость проведения буровых работ.

### **6.6 Разработка конструкции шарошечного долота для бурения мягких пород в составе агрегатов реактивно-турбинного бурения**

Первые попытки создать шарошечное буровое долото, предназначенное специально для бурения способом РТБ, были предприняты в ОАО НПО «Буровая техника» - ВНИИБТ. Специалисты института разработали несколько конструкций буровых долот для этого способа бурения. Основной конструктивной особенностью этих долот было наличие зубчатого вооружения только на половине длины образующих шарошек. Однако данные разработки, хотя и были вне-

дрены в производство, не позволили существенно повысить эффективность бурения стволов и скважин способом РТБ. В связи с этим, на основе анализа данных, полученных как в ходе проведенных научно-исследовательских работ, так и многочисленных промысловых испытаний шарошечных долот разных конструкций и типоразмеров в условиях РТБ, была создана новая геометрия КЗВ шарошечного долота, более полно и точно учитывающая основные особенности условий процесса разрушения забоя большого диаметра при бурении способом РТБ [83, 144].

Суть новой разработки сводится к тому, что в шарошечном долоте для реактивно-турбинного бурения с фрезерованным или литым зубчатым вооружением каждая шарошка изготовлена в виде одноконусной конструкции, нижняя часть образующей которой сориентирована перпендикулярно по отношению к оси вращения агрегата [83, 134]. Торцевые грани калибрующих, основных и вершинных зубьев выполнены вогнутой формы, с радиусами кривизны:  $r_K^1, r_K^2, r_O^1, r_O^2, r_B^1, r_B^2$ , (значки 1 и 2 относятся соответственно к внутренним и наружным радиусам, а буквы  $K, O$  и  $B$  – соответственно к калибрующим, основным и вершинным венцам шарошек) соотношение которых со стороны вершины шарошки должно удовлетворять условию  $r_K^1 > r_O^1 > r_B^1$ , при  $r_B^1 / r_K^1 = (0,35 \div 0,75)$ , а со стороны основания шарошки - удовлетворять условию  $r_K^2 > r_O^2 > r_B^2$ , при  $r_B^2 / r_K^2 = (0,25 \div 0,85)$ .

В дополнение к этому, торцевые грани зубьев образуют с поверхностью забоя углы определенной величины, при этом соотношение величин этих углов: калибрующего  $\alpha_K^1$ , основного  $\alpha_O^1$  и вершинного  $\alpha_B^1$  венцов со стороны вершины шарошки должны удовлетворять условию  $\alpha_K^1 > \alpha_O^1 > \alpha_B^1$ , при  $\alpha_B^1 / \alpha_K^1 = (0,75 \div 0,95)$ . А со стороны основания шарошки:  $\alpha_K^2$ , основного  $\alpha_O^2$  и вершинного  $\alpha_B^2$  венцов должны удовлетворять условию  $\alpha_K^2 > \alpha_O^2 > \alpha_B^2$ , при  $\alpha_B^2 / \alpha_K^2 = (0,67 \div 0,92)$  (рисунок 6.16). Такие геометрические характеристики зубчатого вооружения ШБИ позволяют существенно повысить разрушающую способность его зубьев в направлении наибольшего скольжения вооружения по горизонтальному забою, определяемого переносным движением ШБИ относительно оси вращения агрегата РТБ (рисунок 3.18).

Шарошечное долото для РТБ состоит из корпуса 1 с промывочной системой, образованной несколькими каналами 4 и лапами 2, на цапфах которых установлены шарошки 3 с вершинными 7, основными 6 и периферийными венцами 5. Внутренние и наружные торцевые грани зубьев выполнены с определенными радиусами кривизны. Все шарошки 3 ШБИ представляют собой одноконусные конструкции, нижние части образующих которых сориентированы перпендикулярно по отношению к оси вращения агрегата РТБ.

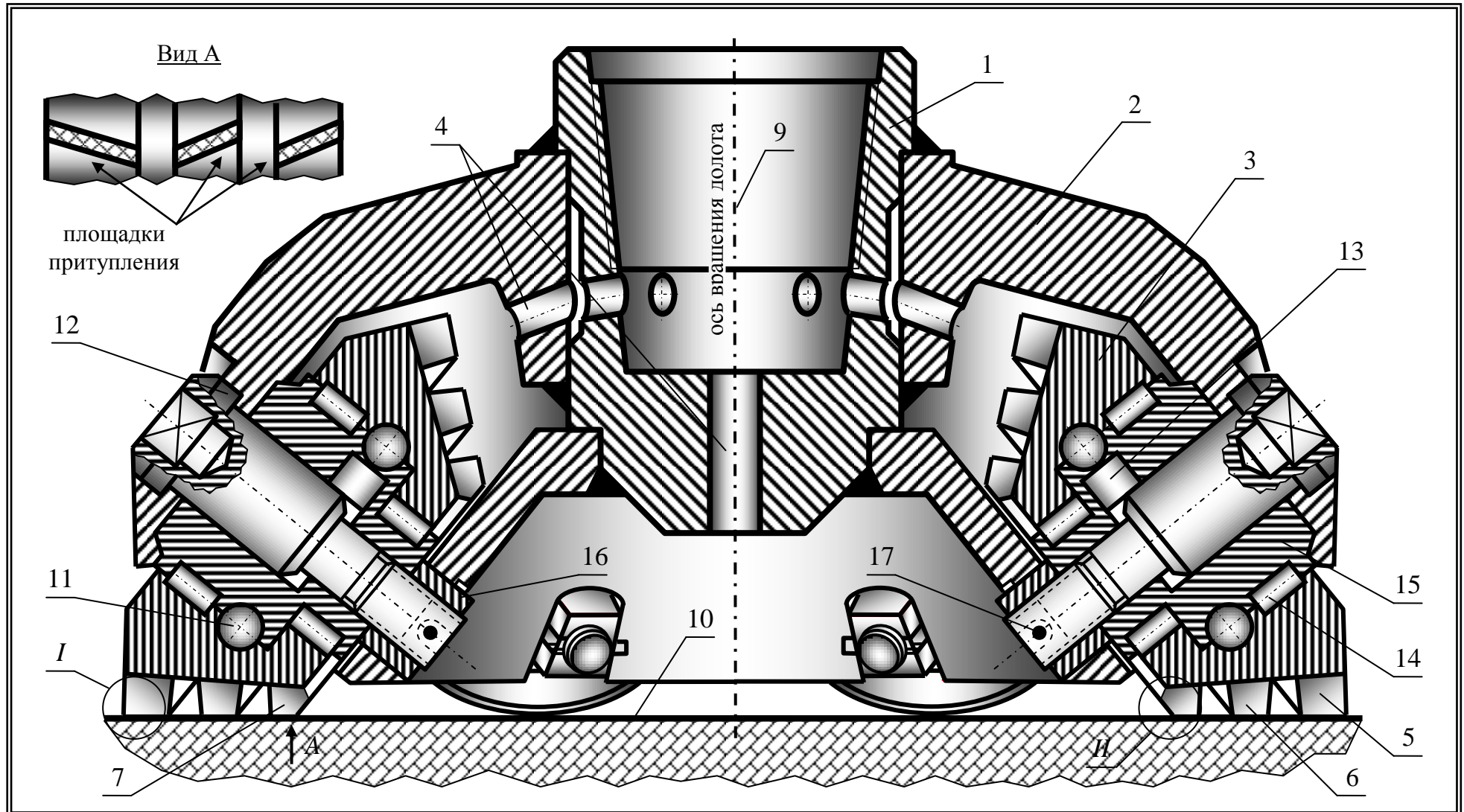


Рисунок 6.16 - Шестишарошечное долото со сменными шарошками: 1-корпус; 2-лапа; 3-шарошка; 4-канал промывки; 5-калибрующий венец; 6-основной венец; 7-вершинный венец; 9-ось вращения долота; 10-поверхность забоя; 11-шарик; 12-ось шарошки; 13-палец; 14-ролик; 15-цапфа; 16-втулка; 17-шплинт.

Принцип работы инструмента сводится к следующему. Под воздействием осевой нагрузки на агрегат РТБ и крутящих моментов, передаваемых его турбобурами на каждое входящее в состав навески агрегата шарошечное долото зубья вооружения шарошек 3 внедряются в поверхность забоя и разрушают его. При этом зубчатое вооружение ШБИ осуществляет не только относительное движение с угловой скоростью  $\omega_D$  вокруг оси долота 9, но и переносное вокруг оси вращения агрегата РТБ (рисунок 3.18). Это переносное движение вызывает значительные проскальзывания зубчатого вооружения шарошек по поверхности горизонтального забоя не только вдоль осей вращения шарошек, но и в перпендикулярных и угловых к ним направлениях. Главной особенностью такого скольжения является тот факт, что зубья вооружения шарошек в определенных точках своей траектории движения проскальзывают не по направлению воздействия их основных рабочих граней, а в перпендикулярной к ним плоскости. В связи с этим в точках *B* и *D* основную работу по разрушению породы забоя, связанную со скольжением зубчатого вооружения, осуществляют либо торцевые поверхности зубьев, обращенные к основанию шарошки и ее калибрующий конус, либо торцевые поверхности зубьев, обращенные к вершине шарошки. Поэтому при бурении мягких пород необходимо уменьшать передний угол резания торцевых поверхностей зубьев вооружения шарошки, принимающих наиболее значительное участие в разрушении породы горизонтального забоя. Таким образом, помимо улучшения условий резания мягких пород будет обеспечиваться частичное выравнивание нагрузки на зубья всех без исключения венцов зубчатого вооружения шарошки.

Соблюдение этого условия даст возможность наиболее полно использовать работу внешних и внутренних торцевых поверхностей каждого из зубьев вооружения, одновременно разрушающих горную породу на поверхности забоя при скольжении зубчатого вооружения шарошек, вызываемым вращением агрегата РТБ.

Связано это с тем, что в момент наибольшего скольжения вооружения по горизонтальному забою 10, определяемого переносным движением ШБИ относительно оси вращения агрегата РТБ, больший объем работы по разрушению горной породы производится торцевыми поверхностями зубьев 5 калибрующего конуса шарошки, чуть меньший торцевыми поверхностями зубьев 6 основного ряда и незначительная часть - теми же поверхностями зубьев вершинного ряда 7. С целью снижения неравномерности нагрузки на все торцевые поверхности зубьев всех рядов вооружения необходимо создать различные передние углы резания для всех торцевых поверхностей. Это достигается путем выполнения зубьев вогнутой формы с радиусами кривизны со стороны вершины

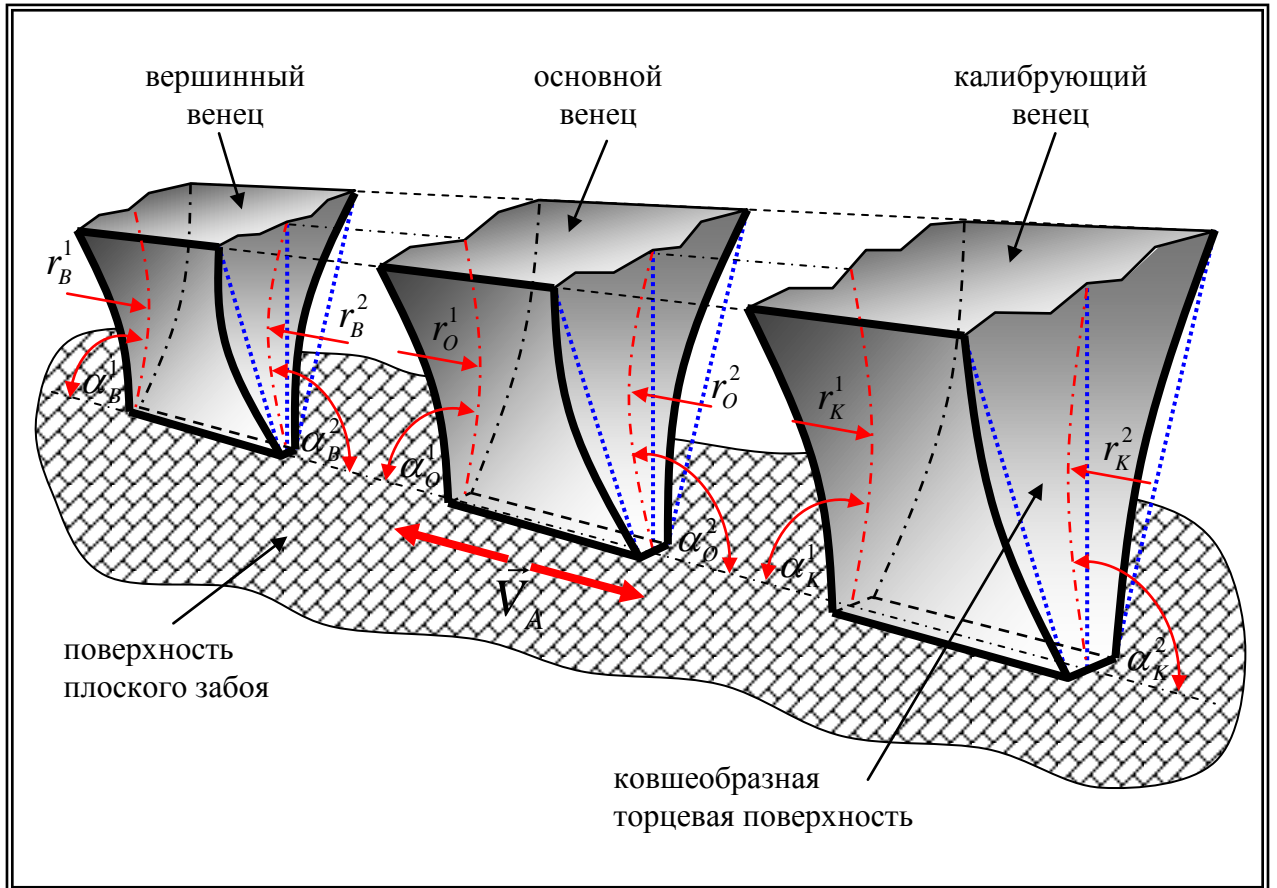


Рисунок 6.17 - Конфигурация торцевых поверхностей зубьев вооружения

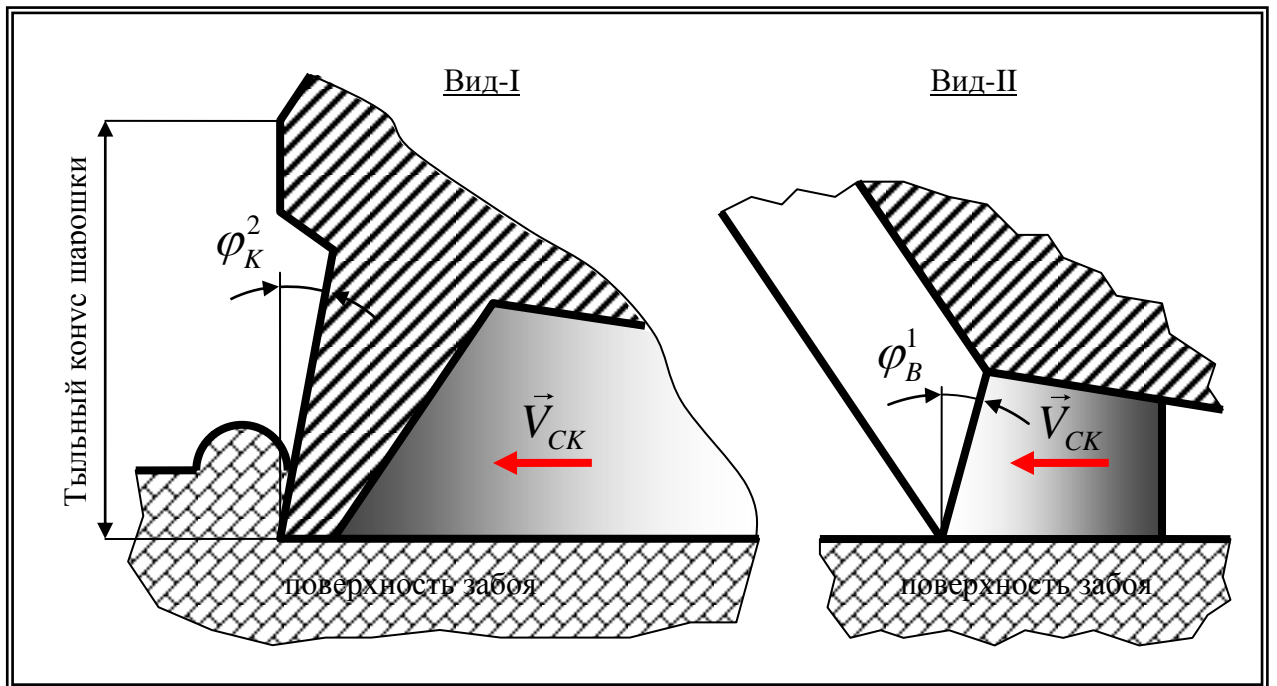


Рисунок 6.18 - Угловое выполнение торцевых поверхностей зубьев вооружения



шарошки, удовлетворяющими условию  $r_k^1 > r_o^1 > r_b^1$  (значки 1 и 2 относятся соответственно к внутренним и наружным радиусам, а буквы  $k$ ,  $o$  и  $b$  – соответственно к калибрующим, основным и вершинным венцам шарошек), а со стороны основания шарошки радиусы кривизны должны удовлетворять условию  $r_k^2 > r_o^2 > r_b^2$  (рисунок 6.17).

Венцы 6, расположенные на основных конусах шарошек, могут оснащаться как ПЗВ, так КЗВ, в зависимости от типа разбуриваемых пород. Основные защищаемые признаки изобретения могут применяться для вооружения шарошечного бурового инструмента с любым количеством шарошек и с любым видом вооружения. Также возможно угловое выполнение торцевых поверхностей с передними углами резания  $\varphi_k^2$  и  $\varphi_b^1$  (рисунок 6.18)

Таким образом, применение предложенных новых вариантов исполнения геометрии зубчатого вооружения шарошечного долота даст возможность повысить эффективность работы ШБИ при использовании его в составе агрегатов РТБ за счет повышения разрушительной способности зубчатого вооружения и снижения энергетических затрат, необходимых для успешного протекания процесса разрушения породы забоя большого диаметра. Это в конечном итоге позволит увеличить проходку на «навеску инструмента» и механическую скорость бурения агрегатами РТБ и соответственно снизить стоимость проведения буровых работ при создании стволов и скважин больших диаметральных размеров.

### **6.7. Разработка конструкции шарошечного долота для бурения средних абразивных пород в составе агрегатов реактивно-турбинного бурения**

С целью дальнейшей практической реализации полученных результатов в ходе проведенных исследований была разработана новая конструкция ШБИ, оснащенная разноориентированным зубчатым твердосплавным вооружением [170, 171], предназначенная для бурения высокоабразивных средних пород в составе агрегатов РТБ.

Отличительной особенностью данного инструмента (рисунок 6.19) является то, что каждая шарошка изготовлена в виде одноконусной конструкции, нижняя часть образующей которой сориентирована перпендикулярно по отношению к оси вращения агрегата. Каждая шарошка ШБИ оснащена вершинным венцом, который обладает таким же углом конусности, как и основные венцы, и одинаковым с ними вылетом твердосплавных зубков, расположенных под острыми углами по отношению к оси вращения ШБИ [84, 133]. Вершины твердосплавных зубков периферийного (калибрующего) и вершинного венцов разнесены на определенное расстояние  $h_k$  относительно друг друга, которое определяется соотношением  $h_k = (0,5 \div 1,1)h$ , где  $h$  - вылет твердосплавных зубков на основных венцах. Угол наклона

$\beta_K$  осей зубков периферийного (калибрующего) венца по отношению к оси вращения ШБИ связан с углами наклона осей зубков вершинного венца  $\beta_B$  к оси вращения ШБИ, соотношением  $\beta_B = (0,16 \div 1,83) \beta_K$ . Величины передних углов резания периферийного (калибрующего)  $\varphi_K$  и вершинного  $\varphi_B$  венцов должны соотноситься как  $\varphi_B \geq \varphi_K$ , при  $\varphi_B = (0 \div 25^\circ)$ . Твердосплавные зубки вершинного венца размещены в теле шарошки инструмента так, чтобы их площадки притупления были наклонены к касательной к окружности, описанной вокруг вершин этих зубков, на угол  $\psi$ , принимающий значения от  $-5^\circ$  до  $+5^\circ$ .

Такие геометрические характеристики зубчатого вооружения ШБИ позволяют значительно увеличить разрушающую способность инструмента и уменьшить неравномерность перераспределения нагрузки между «передней» к направлению скольжения вооружения по горизонтальному забою, определяемого переносным движением ШБИ относительно оси вращения агрегата РТБ, и «задней» шарошками ШБИ.

Шарошечное долото для РТБ (рисунок 6.19) состоит из корпуса 1 с промывочной системой, образованной несколькими каналами 4 и лапами 2, на цапфах которых установлены шарошки 3 с основными 6, вершинными 7 и периферийными (калибрующими) венцами 5, оснащенными твердосплавными зубками 5, имеющими клиновидные рабочие головки. Основные рабочие грани головок твердосплавных зубков каждого периферийного венца 5 сориентированы параллельно образующим поверхностям основного и калибрующего конусов шарошек 3. Все шарошки 3 ШБИ представляют собой одноконусные конструкции, нижние части образующих которых сориентированы перпендикулярно по отношению к оси вращения агрегата РТБ. Каждая из шарошек, оснащена вершинным венцом 7, обладающим аналогичным углом конусности основным венцам 6 и имеющим равные с ними вылеты твердосплавных зубков, зафиксированных под углом  $\beta_B$  по отношению к оси вращения ШБИ.

Принцип работы инструмента, сводится к следующему. Под воздействием осевой нагрузки на агрегат РТБ и крутящих моментов, передаваемых его турбобурами на каждое входящее в состав навески агрегата шарошечное долото, зубья вооружения шарошек 3 внедряются в поверхность забоя и разрушают его. При этом зубчатое вооружение ШБИ осуществляет не только относительное движение с угловой скоростью  $\omega_D$  вокруг оси долота 9, но и переносное, вокруг оси вращения агрегата РТБ (рисунок 3.18), которое сопровождается существенным скольжением зубчатого вооружения шарошек 3 по забою ствола большого диаметра (подробно описанного ранее). Схема поражения забоя ПЗВ передней ( $3^1$ ) и задней ( $3^2$ ) шарошек в момент и направлении их максимального скольжения по забою, определяемого вращением агрегата РТБ, представлена на (рисунок 6.20.1).

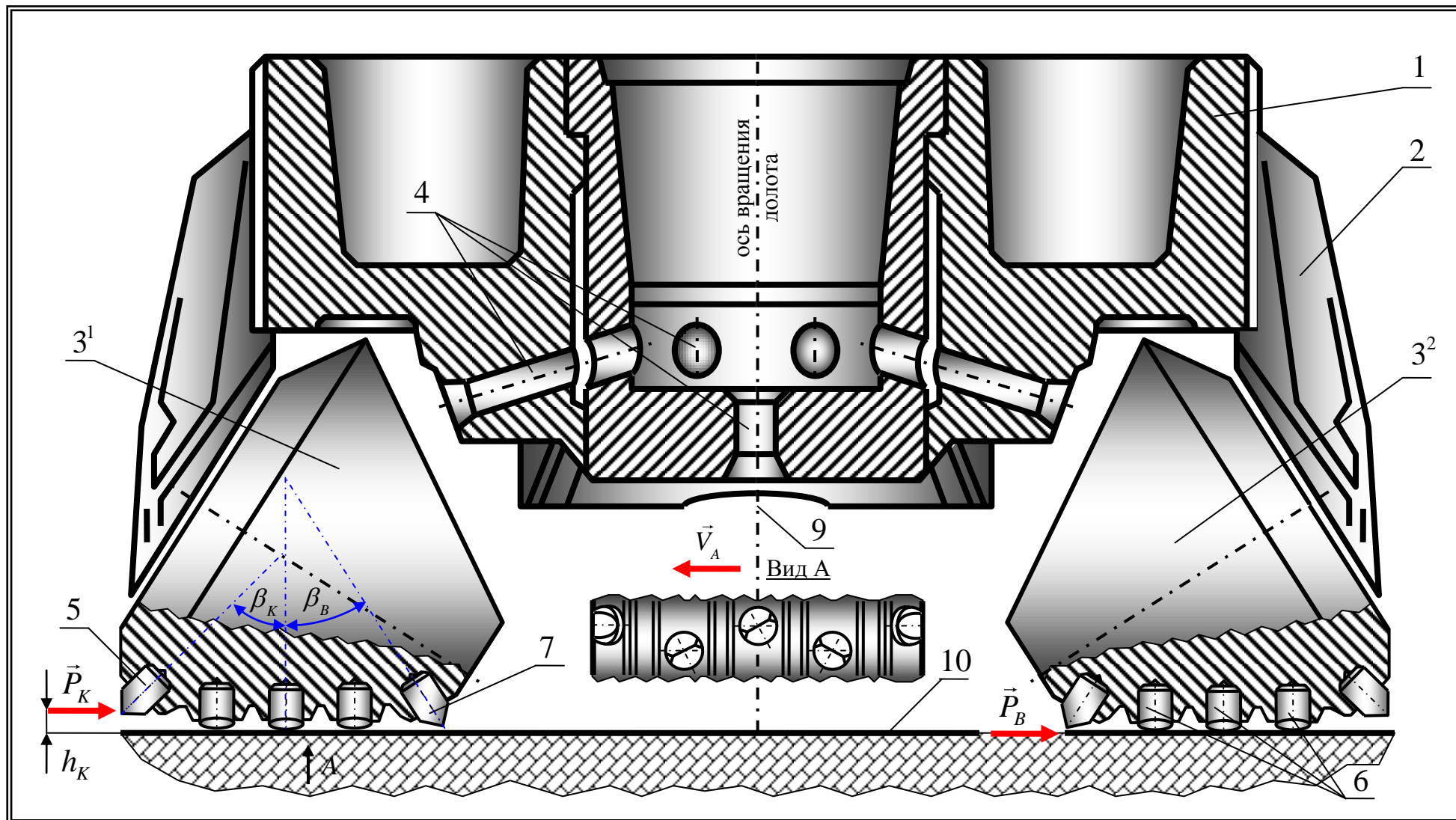


Рисунок 6.19 - Схема шестишарошечного долота с разнонаправленным вооружением

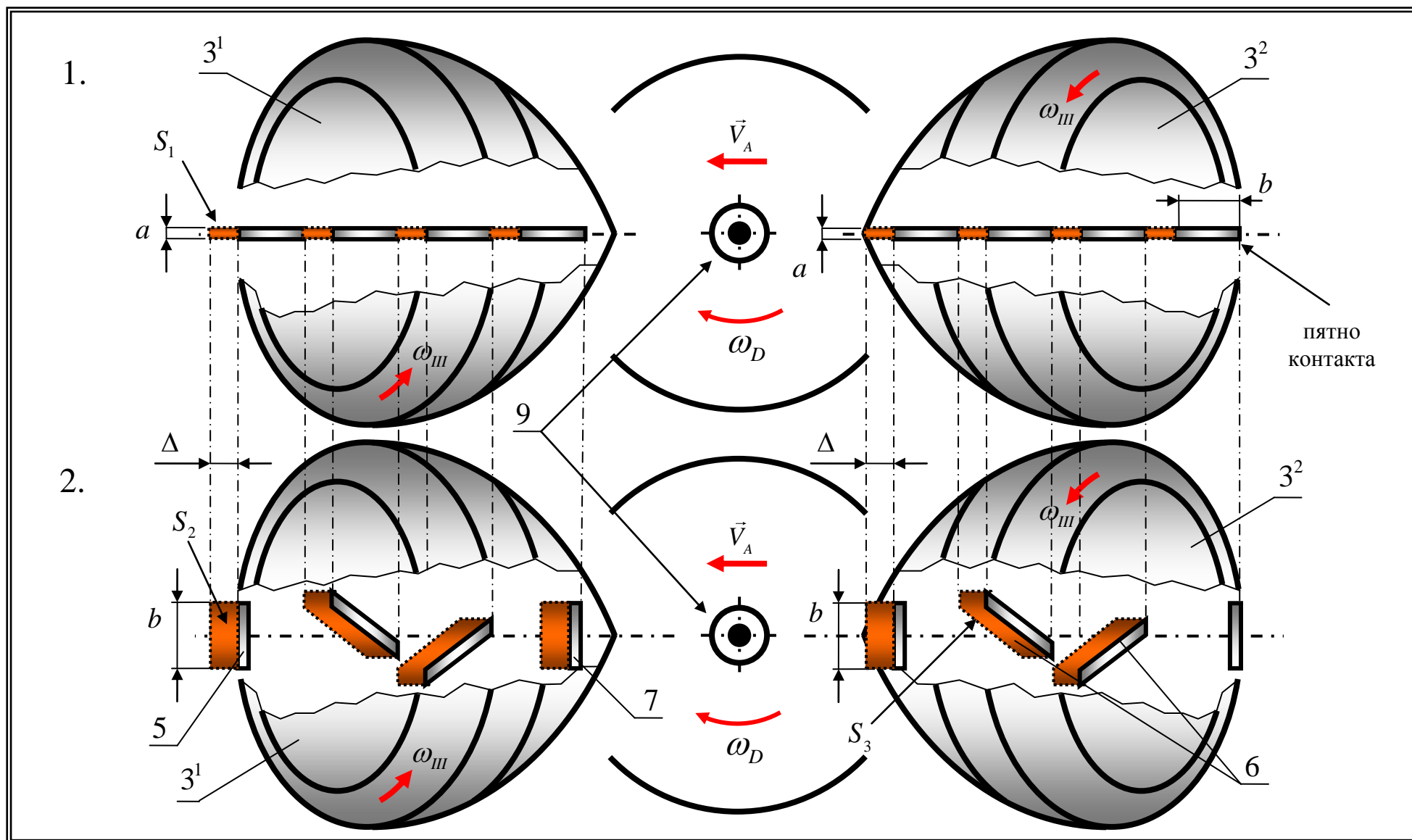


Рисунок 6.20 - Схемы поражения забоя ПЗВ и КЗВ «передней» и «задней» шарошек ШБИ

В этом случае суммарная площадь поражения поверхности забоя ПЗВ данных шарошек по горизонтали определится путем простого сложения площадей прямоугольников (рисунок 3.18) со сторонами: « $a$ » - ширина торцевой поверхности зубка;  $\Delta$  - величина скольжения шарошки. Очевидно, что эффективность разрушения породы забоя при такой ориентации твердосплавных зубков в теле шарошек по отношению к направлению скольжения зубчатого вооружения является минимальной. Чтобы повысить эффективность работы ШБИ с твердосплавным вооружением, за счет увеличения суммарной площади поражения поверхности забоя, необходимо оснастить его шарошки разноориентированным зубчатым вооружением (рисунок 6.20.2).

Оценить увеличение площади поражения поверхности забоя в случае использования разноориентированного КЗВ по сравнению с ПЗВ возможно определив разницу площадей соответствующих фигур:  $S_1 = a\Delta$  и  $S_2 = b\Delta$ , где  $b$  - ширина зубка (рисунок 6.20).

Однако, чтобы обеспечить наибольшую эффективность работы разноориентированного твердосплавного зубчатого вооружения [96, 111] в условиях РТБ, нужно уже на этапе проектирования обеспечить строго определенную ориентацию твердосплавных зубков на различных венцах вооружения шарошек (рисунок 6.19), а также их расположение по отношению к поверхности забоя (рисунок 6.21). Объясняется это тем, что в момент наибольшего проскальзывания зубчатого вооружения, вызванного вращением агрегата РТБ, более значительная часть работы по разрушению породы и формированию плоского забоя производится калибрующим конусом передней ( $3^1$ ) шарошки. В результате, на его вооружение действует сила реакции разрушаемой породы  $P_K$ , которая, в связи с большими диаметрами ШБИ, приводит к их незначительному перекашиванию, которое в свою очередь становится причиной частичного отжатия задней ( $3^2$ ) шарошки от поверхности забоя.

С целью предотвращения этого негативного явления, необходимо зубки (7) вершинного венца шарошки преднамеренно углублять на большую величину и устанавливать с меньшим углом резания  $\varphi_B$ , чем зубки (5) калибрующего венца с углом резания  $\varphi_K$ . В этом случае, сориентированные таким образом под углом  $\beta_B$  зубки вершинного венца (7) задней шарошки ( $3^2$ ), под воздействием силы реакции разрушаемой породы  $P_B$ , углубляясь на большую величину и под меньшим углом, позволят не только увеличить площадь поражения забоя по горизонтали, но и будут играть стабилизирующую роль, препятствующую «отжиму» шарошки ( $3^2$ ) от поверхности забоя. Обеспечение выполнения этого условия даст возможность повысить эффективность работы набегающих и сбегаящих граней всех без исключения твердосплавных зубков, одновременно взаимодействующих с забоем, при проскальзывании вооружения шарошек, вызванном вращением агрегата РТБ.

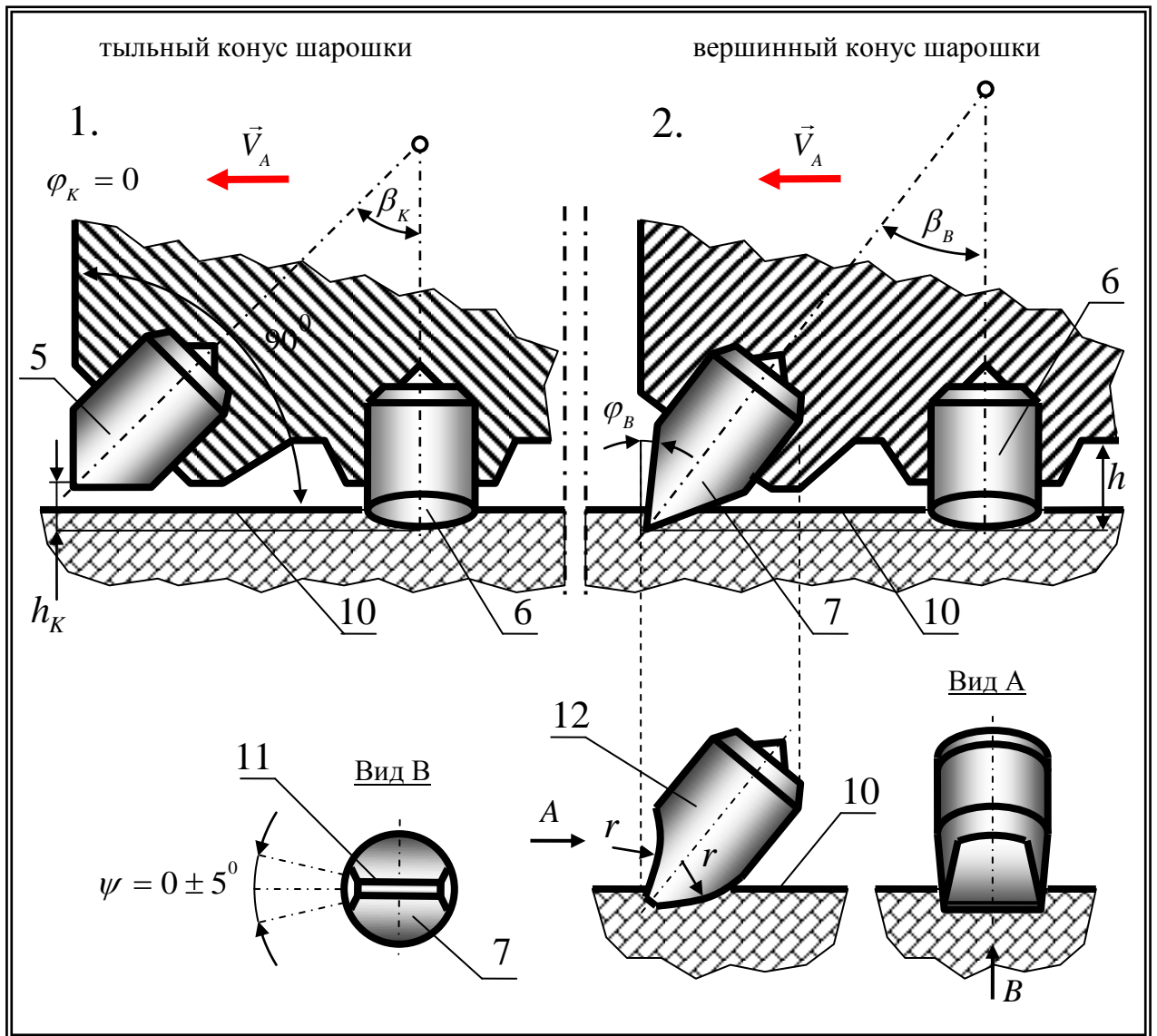


Рисунок 6.21 - Схема расположения твердосплавных зубков на калибрующем (тыльном) и вершинном конусах шарошек

Зубки (7), вершинного ряда шарошки в момент их наибольшего проскальзывания по поверхности забоя, определяемого вращением агрегата РТБ, одновременно с этим осуществляют вращение вокруг оси шарошки ШБИ. В результате этого они двигаются по винтообразной траектории, направление подъема винтовой линии которой зависит только от направления вращения исполнительного органа агрегата РТБ. Поэтому твердосплавные зубки (7) должны быть зафиксированы в теле шарошки инструмента так, чтобы их площадки притупления были наклонены к касательной к окружности, описанной вокруг вершин этих зубков, на угол  $\psi$ , принимающий значения от  $-5^{\circ}$  до  $+5^{\circ}$ . При этом твердосплавные зубки (7) могут обладать как плоскими основными боковыми рабочими поверхностями, так и криволинейными с определенной кривизной  $r$  (12), которая главным образом зависит от физико-механических свойств разбуриваемых горных пород (рисунок 6.21).

Таким образом, применение предложенной новой геометрии твердосплавного зубчатого вооружения шарошечного долота позволит повысить эффективность работы ШБИ при его использовании в агрегатах РТБ за счет повышения разрушительной способности твердосплавного зубчатого вооружения и снижения энергетических затрат, необходимых для успешного осуществления процесса разрушения средних абразивных пород. Это в конечном итоге позволит увеличить проходку на «навеску инструмента» и механическую скорость бурения средних абразивных пород агрегатами РТБ.

### **6.8 Разработка конструкции шарошечного долота для бурения твердых пород в составе агрегатов реактивно-турбинного бурения**

Основывалась на теоретическом анализе взаимодействия вооружения бурового инструмента с забоем скважины при РТБ и анализе состояния твердосплавных зубчатых элементов серийных буровых долот (Ш490ТЗ-ЦВР) после отработки [53, 141], в конструкцию серийного долота были внесены существенные коррективы, в корне изменяющие геометрию его вооружения. Отличительной особенностью нового ШБИ (рисунок 6.22) является то, что каждая шарошка изготовлена в виде многоконусной конструкции и оснащена разноориентированным твердосплавным зубчатым вооружением, при этом нижние части образующих шарошек сориентированы перпендикулярно по отношению к оси вращения агрегата РТБ. Данная геометрия вооружения шарошек дает возможность обеспечивать равномерное изнашивание твердосплавных зубков на каждом из венцов зубчатого вооружения, а также стабилизировать процесс изменения контактного давления твердосплавных зубков вооружения на поверхность забоя в течение всего времени работы ШБИ [53, 139].

Шарошечное долото для РТБ состоит из корпуса 1, оснащенного промывочной системой и лапами, на цапфах 2 которых, установлены шарошки 3, включающие в себя основные 4, промежуточные 5 и периферийные 6 венцы, армированные твердосплавными зубками 6. Основной конус шарошки 4 имеет несколько венцов с твердосплавными зубками 6. Каждая шарошка 3, является многоконусной, причем  $1/2$  угла конусности  $\beta_0$  основных венцов 4 рассчитывается по формуле:  $\beta_0 = 90^\circ - \varphi_0$ , где  $\varphi_0$  наклон оси цапфы к оси вращения ШБИ, град. Углы конусности промежуточного 5 и периферийного 6 венцов уменьшаются по направлению от основного до периферийного венца и соотносятся между собой следующим образом:

$$\beta_1 = \beta_0 - \arctg \frac{(0,7 \div 1,1)h_1}{l_1}; \quad (6.24)$$

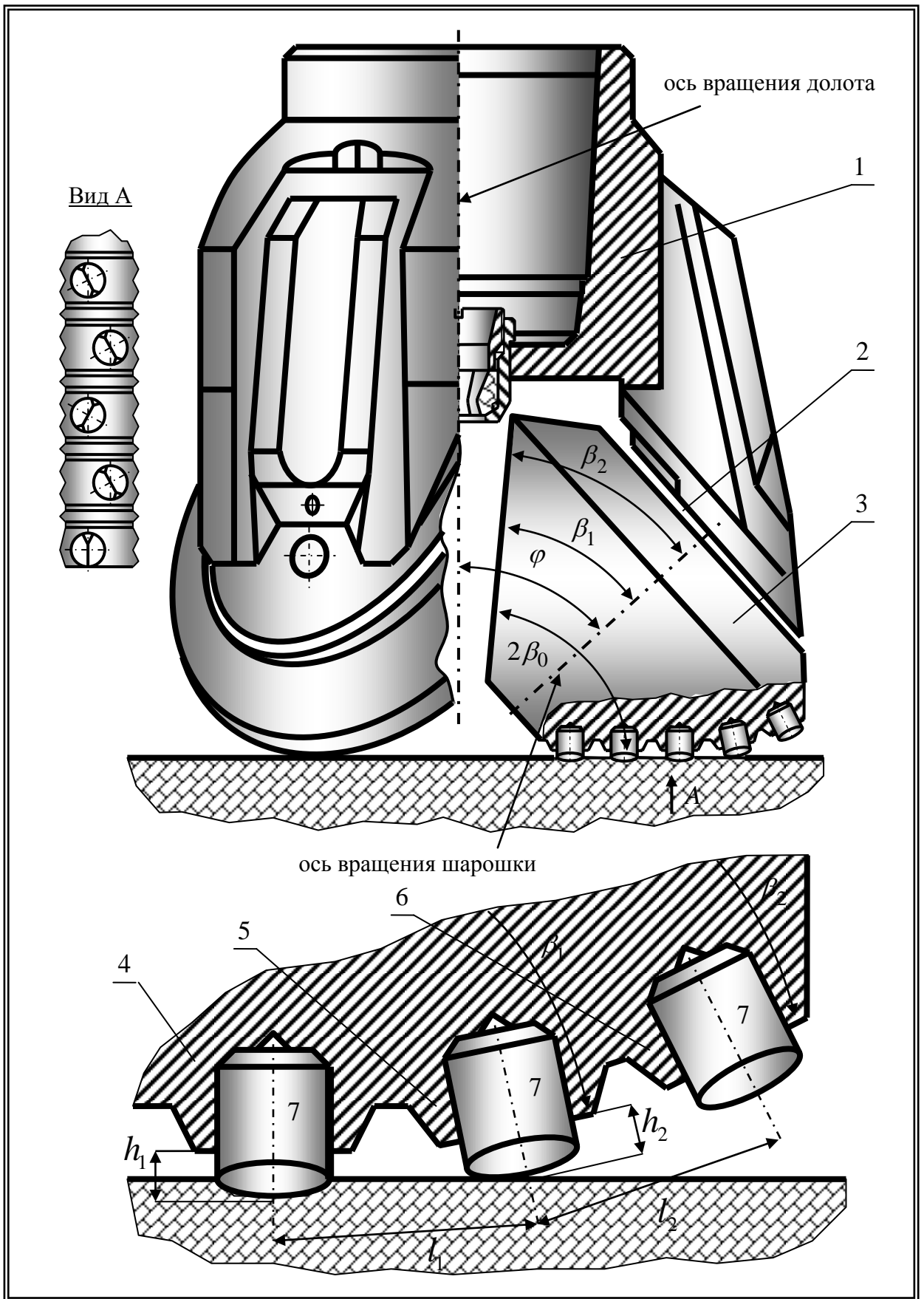


Рисунок 6.22 - Схема шарошечного долота для твердых пород с разноориентированным зубчатым твердосплавным вооружением



$$\beta_2 = \beta_0 - \operatorname{arctg} \frac{(2,4 \div 2,8)h_2}{l_2}, \quad (6.25)$$

где

$\beta_1$  и  $\beta_2$  половины углов конусности промежуточного и периферийного зубчатых венцов вооружения шарошки, град.;

$h_1$  и  $h_2$  вылеты твердосплавных зубков на основных и промежуточном зубчатых венцах вооружения шарошки, мм;

$l_1$  - межосевое расстояние между вершинами твердосплавных зубков промежуточного венца и соседнего с ним основного зубчатого венца вооружения шарошки, мм;

$l_2$  - межосевое расстояние между вершинами твердосплавных зубков промежуточного и периферийного зубчатых венцов вооружения шарошки, мм.

Таким образом, вооружение шарошки условно разделено на три зоны [53]:

- основную, образованную несколькими венцами, нижняя образующая которых представляет собой «плоскую» поверхность, перпендикулярную к оси вращения долота, позволяющую не только повысить степень измельчения шлама, но и обеспечивать равномерный износ твердосплавного зубчатого вооружения в течение всего времени работы инструмента;
- вспомогательную, состоящую из одного венца с углом конусности  $2\beta_1$ , служащую для предварительного режуще-скалывающего разрушения породы забоя при проскальзывании зубчатого вооружения шарошек, связанного с вращением агрегата РТБ в процессе его работы;
- центрирующую, включающую в себя один периферийный венец с углом конусности  $2\beta_2$ , служащую для разрушения породы забоя и центрирования агрегата РТБ.

Принцип работы инструмента сводится к следующему. Под воздействием осевой нагрузки на агрегат РТБ и крутящих моментов, передаваемых его турбобурами на каждое входящее в состав навески агрегата шарошечное долото, твердосплавные зубки 7 вооружения шарошек 3, внедряются в поверхность забоя и разрушают его. При этом твердосплавное зубчатое вооружение ШБИ осуществляет не только относительное движение вокруг осей каждой из шарошек, но и переносное, вокруг осей вращения ШБИ и агрегата РТБ, которое сопровождается существенным скольжением зубчатого вооружения шарошек 3 по забою ствола большого диаметра как вдоль, так и поперек осей вращения шарошек.

Скольжение твердосплавных зубьев вооружения по забою в продольном направлении обусловлено вращательным движением ШБИ вокруг оси вращения агрегата РТБ и является одной из основных причин быстрого износа твердосплавного зубчатого вооружения шарошек. Для того чтобы уменьшить влияние этого негативного явления и тем самым снизить износ

твердосплавного вооружения, в новой конструкции были изменены геометрии не только самих шарошек, но и их зубчатого вооружения. Исходя из условий работы ШБИ при РТБ одним из которых является формирование плоского горизонтального забоя, угол конусности основных венцов 4 принимается равным  $2\beta_0$ , а с целью обеспечения предварительного разрушения породы забоя промежуточного  $2\beta_1$  и периферийного  $\beta_2$  назначаются исходя из соотношения  $\beta_0 > \beta_1 > \beta_2$ , и рассчитываются по приведенным ранее формулам. Окончательное разбуривание забоя выполняется основными венцами 4, обеспечивающими скалывание горной породы в режиме объемного разрушения. Величины углов конусности и вылет твердосплавного зубчатого вооружения всех без исключения венцов шарошек выбираются в зависимости от характеристик разбуриваемых пород.

С целью увеличения стойкости твердосплавного зубчатого вооружения к знакопеременным динамическим нагрузкам за счет уменьшения жесткости системы «порода – зубок - шарошка», в конструкции нового долота имеются специальные разгрузочные канавки. Их наличие позволяет значительно снизить концентрацию напряжений, возникающих в зоне входа твердосплавного режущего элемента в тело шарошки. Геометрические размеры разгрузочных канавок, полученные на основе теоретических расчетов и с учетом условий производства, глубина  $4,7^{-0,2}$  мм, ширина  $5^{+0,5}$  мм.

## **6.9 Промышленные испытания опытных образцов шарошечного бурового инструмента новых конструкций**

Основной целью проведения промышленных испытаний опытных образцов является подтверждение работоспособности ШБИ, оснащенного косозубым вооружением с различной геометрией, новой конструкцией центробежно-объемно-армированного косозубого асимметричного вооружения и новыми конструкциями гидромониторных промывочных узлов. А также осуществление сравнительного анализа, технико-экономических показателей бурения новых конструкций шарошечного бурового инструмента с его серийными аналогами в реальных условиях бурения.

Промышленные испытания опытного шарошечного бурового инструмента были проведены в соответствии с «Типовой методикой проведения промышленных испытаний опытных и опытно-промышленных партий шарошечных долот новой конструкции» (РД 39-2-754-82) [165].

### **6.9.1 Объекты промышленных испытаний**

Новые конструкции центробежно-объемно-армированного разноориентированного зубчатого вооружения были изготовлены на предприятиях ОАО «Сарапульский машзавод» и ЗАО «Завод экспериментальных машин».

Опытные образцы шарошечных буровых долот П490С-ЦВР-1 с разноориентированным центробежно-объемно-армированным зубчатым вооружением (рисунок 6.23), твердосплавным разнонаправленным вооружением П490ТЗ-ЦВР-9 (рисунок 6.24) были изготовлены на ОАО «Сарапульский машзавод».

Опытные образцы шарошечных буровых долот П295,3М-ЦГВ с косозубым разнонаправленным вооружением (рисунок 6.25), а также режущие комплекты шарошечных буровых долот П295,3М-ЦГВ с однонаправленным и разнонаправленным косозубым вооружением, предназначенные для оснащения шарошечных расширителей типа 6ШР-555М, были изготовлены на ОАО «Волгабурмаш».

Опытные образцы гидромониторных промывочных узлов диффузорного и конфузорного типов с асимметричным шестигранным внутренним поперечным сечением изготавливались на ЗАО «Проммашсервис» (рисунок 6.26).

Опытные образцы шарошечных расширителей 6ШР-555М с разнонаправленным косозубым вооружением (рисунок 6.27), были изготовлены на ЗАО «Проммашсервис».

Промышленные испытания опытных шарошечных долот П490С-ЦВР-1 с разноориентированным центробежно-объемно-армированным зубчатым вооружением проводились в сравнении с серийными долотами П490С-ЦВР, оснащенными поверхностно-армированными прямыми зубьями. Испытания проводились на вентиляционной скважине одного из участков шахты «Брянковская» в процессе реактивно-турбинного бурения ствола диаметром 4,0 м в породах категории твердости 5 - 7 (приложение 7) [93]. Бурение осуществлялось при следующих технологических режимах:

осевая нагрузка на долото, т	5
частота вращения агрегата, мин <sup>-1</sup>	4
частота вращения турбобуров, мин <sup>-1</sup>	550
расход промывочной жидкости, л/с	100

Промышленные испытания опытных шарошечных буровых долот с твердосплавным разнонаправленным зубчатым вооружением П490ТЗ-ЦВР-9 проводились в сравнении с серийными долотами П490ТЗ-ЦВР, имеющих вооружение только на двух периферийных венцах шарошек. Испытания были проведены на скважине «Южная» производственного объединения «Ростовуголь» в процессе бурения ствола диаметром 4,0 м в породах с категорией твердости 7 - 9 (приложение 8) [170]. Бурение осуществлялось при следующих технологических режимах:



Рисунок 6.23 - Трехшарошечное долото П490С-ЦВР-1 для РТБ

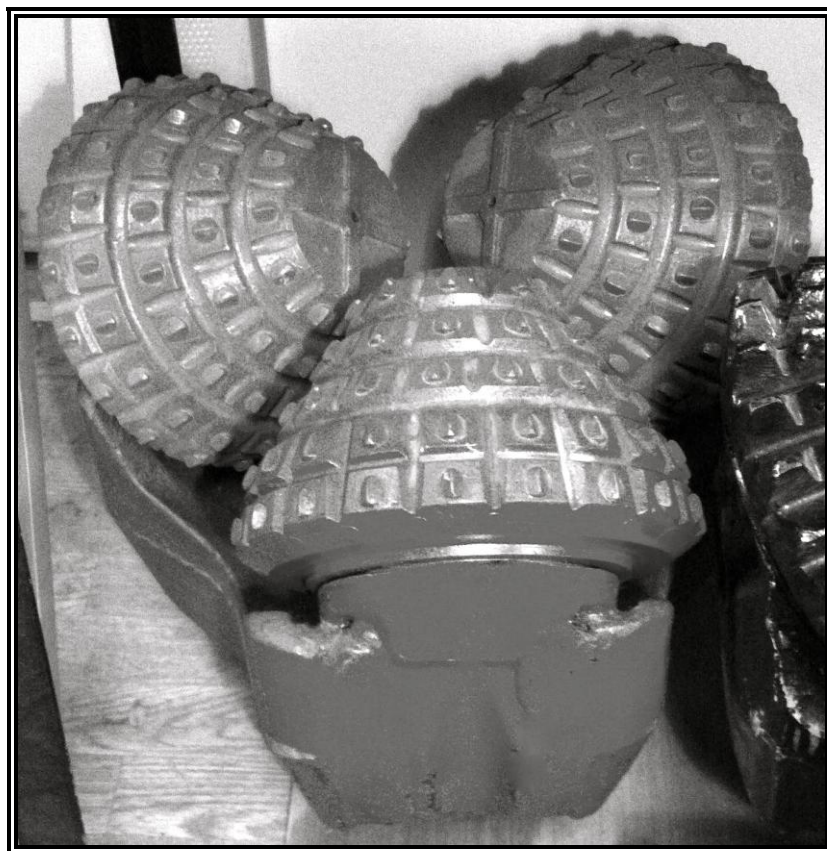


Рисунок 6.24 - Трехшарошечное долото П490ТЗ-ЦВР-9 для РТБ



Рисунок 6.25 - Трехшарошечное долото П295,3М-ЦГВ с разнонаправленным косо зубым вооружением

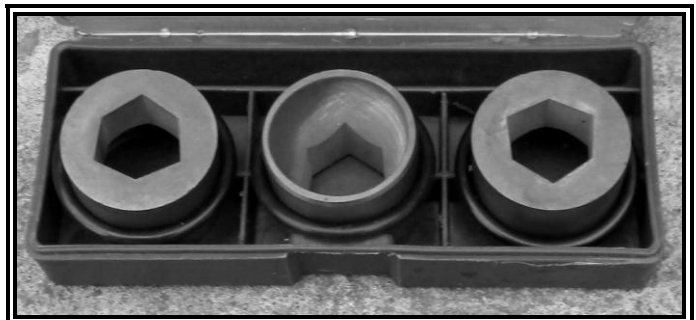
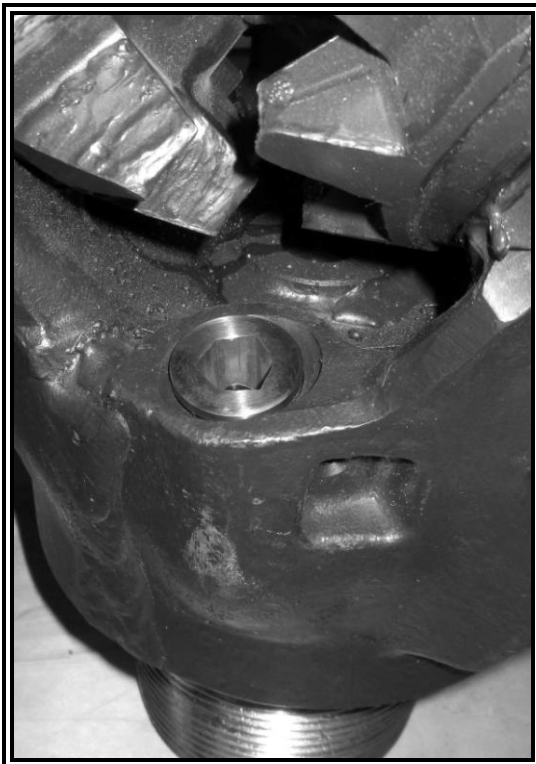


Рисунок 6.26 - Расположение и варианты исполнения шестигранных асимметричных гидромониторных насадок





Рисунок 6.27 – Пилотное долото ПД295,3М-ЦГВ и шестишарошечный расширитель 6ШР-555М с разнонаправленным косозубым вооружением

нагрузка на агрегат, т	30
частота вращения агрегата, мин <sup>-1</sup>	1
частота вращения турбобуров, мин <sup>-1</sup>	600

Промышленные испытания опытных шарошечных долот Ш295,3М-ЦГВ с разнонаправленным косозубым поверхностно-армированным вооружением (рисунок 6.25) проводились в сравнении с серийными долотами Ш295,3М-ЦГВ с прямозубым вооружением на скважинах Мухановского и Кулешовского месторождений Самарской области при бурении скважин в интервале от 315 до 1200 м (приложение 5). Параметры режима бурения и бурового раствора:

- компоновка бурового инструмента	ДР 240 + ротор
- осевая нагрузка на долото, кН (т.с.)	9 - 14
- частота вращения долота, об/мин	160 + 60
- расход бурового раствора, л/с	52 - 54
- условная вязкость, с	35 - 45
- плотность промывочной жидкости- г/см <sup>3</sup>	1,12 - 1,14

Промышленные испытания опытных образцов центральных гидромониторных промывочных узлов диффузорного типа с асимметричным шестигранным внутренним поперечным сечением в сравнении с серийными штатными насадками с круглым поперечным сечением были проведены на долотах Ш490С-ЦВ и Ш393,7С-ЦВ при бурении скважины № 314-4 Отрадинского ГКМ буровых площадей ООО «Юграбурсервис» (приложение 9).

Бурение осуществлялось при следующих технологических режимах:

- интервал бурения, м	30 - 890
- осевая нагрузка на долото, кН (т.с.)	50-160 (5-16)
- частота вращения долота, об/мин	60 - 100
- расход бурового раствора, л/с	56 - 82
- условная вязкость, с	45 - 80
- плотность промывочной жидкости, г/см <sup>3</sup>	1,15 - 1,16

Промышленные испытания опытных шарошечных расширителей 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым поверхностно-армированным вооружением (рисунок 6.27) проводились в сравнении с аналогичными серийными расширителями с прямозубым вооружением на скважинах № 93-1 и № 95-1 буровых площадей ООО «Северо-Запад» (приложение 6).

Бурение осуществлялось роторным способом в интервале от 0-240 м при следующей компоновке бурового инструмента: пилотное долото Ш295,3М-ГВ (с разнонаправленным косозубым вооружением, оснащенное боковыми гидромониторными насадками конфузорного типа

с асимметричным шестигранным внутренним поперечным сечением) + шарошечный расширитель 6РШ-555М (с разнонаправленным косозубым вооружением) + УБТ-203 + УБТ-178 + СБТ-127х9,2Е.

Бурение осуществлялось при следующих технологических режимах:

- осевая нагрузка на долото, кН (т.с.)	80 - 100 (8 - 10)
- частота вращения долота, об/мин	90 - 120
- расход бурового раствора, л/с	30 - 45
- условная вязкость, с	35 - 45
- плотность промывочной жидкости, г/см <sup>3</sup>	1,12

### 6.9.2 Результаты промышленных испытаний

Проведенные промышленные испытания опытных образцов различного шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением показали следующее.

Работа экспериментальных долот Ш490С-ЦВР-1 с разноориентированным центробежно-армированным зубчатым вооружением в условиях РТБ сопровождается значительным уменьшением вибрации исполнительного органа РТБ. Это приводит к снижению знакопеременных динамических нагрузок на вооружение, повышая его долговечность, и увеличению ресурса опорных узлов экспериментальных долот. При этом разноориентированное зубчатое вооружение увеличивает суммарную площадь поражения забоя и за счет этого повышает механическую скорость и проходку на инструмент.

Основные технико-экономические показатели бурения, такие как: механическая скорость бурения, проходка и стойкость вооружения опытных долот Ш490С-ЦВР-1, существенно превосходят аналогичные показатели серийных долот Ш490С-ЦВР по механической скорости бурения на 20 %, по проходке на 46 %, (приложение 7) [93].

Анализ результатов работы опытных Ш490С-ЦВР-1 и серийных долот Ш490С-ЦВР свидетельствуют о том, что значительное увеличение проходки опытными долотами получено как за счет увеличения стойкости вооружения, так и увеличения механической скорости бурения.

Это становится очевидным при анализе состояния вооружения отработанных долот. Характерным видом износа поверхностно-армированного вооружения серийных долот является скалывание отслаивание износостойкого поверхностного слоя (рисунок 3.22) с последующим катастрофическим износом вооружения. Износ центробежно-объемно-армированного вооружения опытных долот сопровождается истиранием центробежно-объемно-армированного композиционного материала без существенных сколов. Это и объясняет значительное повышение стойкости вооружения опытных долот.



Увеличение механической скорости опытных долот объясняется следующим. При анализе вооружения недоработанных серийных долот четко прослеживается тенденция существенного износа вооружения со стороны калибрующих поверхностей шарошек. Особенностью этого износа является значительное притупление угла, образованного смежными поверхностями основного и калибрующего конусов шарошек. В связи с этим, учитывая специфику взаимодействия вооружения бурильного инструмента агрегата РТБ с забоем скважины (калибрующие поверхности долот участвуют не только в калибровании ствола, но и в процессе разрушения породы на забое), снижается агрессивность вооружения и, как следствие, механическая скорость. Вооружение опытных долот Ш490С-ЦВР-1, изготовленное путем центробежно-объемного армирования, изнашивается без существенного изменения угла наклона калибрующих конусов шарошек. Это позволило вооружению опытных долот сохранять требуемую для успешного разрушения породы геометрию калибрующих поверхностей шарошек в течение всего процесса бурения.

Повышению механической скорости бурения также способствовало и то, что разноориентированное зубчатое вооружение опытных долот Ш490С-ЦВР-1 при проскальзывании, связанном с вращением агрегата РТБ, позволило увеличить суммарную площадь поражения забоя в горизонтальной плоскости.

Промышленные испытания опытной партии шарошечных буровых долот Ш490ТЗ-ЦВР-9 показали абсолютное превосходство долот новой конструкции над своими серийными аналогами, долотами Ш490ТЗ-ЦВР. Увеличение по механической скорости бурения в 2 раза; по проходке в 2,5. (приложение 8) [170].

Конструкции серийных долот Ш490С-ЦВР и Ш490ТЗ-ЦВР были разработаны на основе существовавшей ранее теории, что при создании долот для РТБ нет необходимости в вершинных венцах шарошек, так как агрегат работает по принципу планетарного механизма и работа вооружения подобна процессу фрезерования. В дополнение к этому данное техническое решение должно было уменьшить проскальзывание зубьев вооружения по забою, связанное с несоответствием геометрии шарошек с формой конуса чистого качения. Однако проведенные в настоящей работе исследования показали, что несмотря на то, что периферийный ряд шарошек в условиях РТБ участвует не только в калибровании стенки ствола, но и в разрушении породы забоя, вершинные венцы не в меньшей степени участвуют в разрушении породы забоя. Это и подтвердили проведенные промышленные испытания. Экспериментальные долота Ш490ТЗ-ЦВР-9 с шарошками, оснащенными многовенцовым твердосплавным вооружением, вершинные венцы которого образуют плоский забой, позволили увеличить проходку и механическую скорость бурения более чем в 2 раза.

Испытания опытных образцов шарошечных буровых долот П295,3М-ЦГВ с разнонаправленным косозубым вооружением по сравнению с базовой конструкцией серийных долот П295,3М-ЦГВ с прямозубым вооружением показали увеличение механической скорости бурения в интервале 315 - 1300 м на 19 %, при одновременном увеличении проходки на долото на 2 %. При этом во всех случаях поднятие инструмента осуществлялось не в связи с потерей его работоспособности, а по достижении заданной глубины бурения (приложение 5).

Анализ износа отработанных долот показал сбалансированность изнашивания вооружения и опоры у всех экспериментальных долот. Косозубое вооружение изношено минимально и имеет незначительную потерю геометрии вооружения в основном за счет периферийных - калибрующих венцов шарошек. Вместе с тем на серийных долотах с прямозубым вооружением в некоторых местах наблюдаются незначительные сколы как твердосплавного покрытия, так и самой стальной основы зубьев. Износ подшипниковых узлов серийных и экспериментальных долот – незначительный. Люфт в подшипниковых узлах отработанных долот с прямозубым и косозубым вооружением примерно одинаков; потеря диаметра всех долот незначительная. Это свидетельствует о том, что разнонаправленное косозубое вооружение не приводит к существенному дополнительному увеличению радиальной нагрузки на подшипниковые узлы шарошечного бурового инструмента.

Испытания опытных образцов шарошечных буровых долот П490С-ЦВ и П393,7С-ЦВ, оснащенных центральными гидромониторными насадками диффузорного типа с асимметричным шестигранным внутренним поперечным сечением, при роторном способе бурения показали увеличение механической скорости бурения в сравнении со своими аналогами, оснащенными насадками с круглым поперечным сечением, в верхнем интервале бурения на 9 %, а в нижнем на 7 % (приложение 9).

Анализ износа инструмента показал, что вооружение как серийных, так и экспериментальных долот изношено минимально и имеет незначительную потерю геометрии вооружения в основном за счет периферийных венцов шарошек. Размыва центральных гидромониторных узлов опытных долот и выпадения насадок с асимметричным шестигранным внутренним поперечным сечением не зафиксировано, также не установлено дополнительного износа вершинных, основных и периферийных венцов опытных долот, связанного с определенной геометрией и ориентацией центральных экспериментальных гидромониторных насадок диффузорного типа с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением.

Промышленные испытания экспериментальных шарошечных расширителей 6РШ-555М совместно с пилотными опытными долотами П295,3М-ГВ с разнонаправленным косозубым вооружением в сравнении со своими базовыми аналогами с прямозубым вооружением при ро-

торном способе бурения верхних интервалов двух скважин показали увеличение механической скорости бурения на 19 – 23 % (приложение 6).

Анализ износа инструмента показал, что износ всех отработанных шарошечных расширителей по вооружению и опоре незначительный; вооружение изношено минимально и имеет незначительную потерю геометрии вооружения как основных, так и периферийных венцов шарошек; на шарошечных расширителях с прямозубым вооружением в некоторых местах наблюдаются незначительные сколы как твердосплавного покрытия, так и самой стальной основы зубьев; размыва гидромониторных узлов и выпадения насадок пилотных экспериментальных долот Ш295,3М-ГВ не зафиксировано; износ подшипниковых узлов шарошечных расширителей 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением сопоставим с аналогичными показателями расширителей с прямозубым вооружением; потеря диаметра всех шарошечных расширителей незначительная.

Таким образом, проведенные промышленные испытания всех опытных образцов шарошечного бурового инструмента, оснащенного разнонаправленным косозубым вооружением и гидромониторными насадками как диффузорного, так и конфузорного типа с асимметричным шестигранным внутренним поперечным сечением, показали свое преимущество по сравнению с их серийными аналогами, оснащенными прямозубым вооружением и гидромониторными насадками с внутренним круглым поперечным сечением.

По результатам промышленных испытаний некоторые образцы нового шарошечного бурового инструмента, а также его отдельные элементы были внедрены на различных предприятиях, производящих нефтегазовое оборудование:

- заключены лицензионные договора с ОАО «Сарапульский машзавод»:
  - лицензионный договор № 8054/98 от 24.12.96. Пат. 2090732 РФ на изобр. / Ясашин В.А., Сериков Д.Ю. и др. Шарошечное долото для реактивно-турбинного бурения. Б.И. № 26 от 20.06.1996.;
  - лицензионный договор № 11646/2000 от 30.11.2000. Пат. № 2148146 РФ на изобр. / Ясашин В.А., Сериков Д.Ю. и др. Шарошка бурового долота. Б.И. № 12 от 26.04.2000;
  - лицензионный договор № 13143/2001 от 20.06.2001., Пат. № 2169822 РФ на изобр. / Ясашин В.А., Сериков Д.Ю. и др. Шарошечный расширитель. Б.И. № 18 от 26.06.2001.
- на ЗАО «Проммашсервис» согласно Патенту РФ на изобр. № 2600225 был разработан и внедрен в производство шестишарошечный наддолотный расширитель 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением. Согласно Патентам № 2558030 и № 2567561 трехшарошечные долота различных типоразмеров оснащаются гидромониторными насадками с внутренним шестигранным асимметричным сечением.

- на ООО «Росбурчасть» согласно Патентам № 2558030 и № 2567561 разработаны и внедрены в производство гидромониторные насадки диффузорного и конфузорного типа с внутренним шестигранным асимметричным сечением различных размеров;
- на «NRB - New Rock Bits s.r.o.» (Чешская Республика) при проектировании новых видов вооружения внедрена и успешно используется методика определения геометрических параметров вооружения шарошечного бурового инструмента на основе математического моделирования. В соответствии с Патентом РФ на изобретение № 2522608 были разработаны и внедрены в производство трехшарошечные буровые долота с косозубым вооружением различных типоразмеров.

### **Выводы по главе 6**

1 Разработаны новые конструктивные схемы шарошечных буровых долот:

- с центральной промывкой и косозубым вооружением, оснащенная центральной асимметричной шестигранной насадкой диффузорного типа и однонаправленным косозубым вооружением, обеспечивающим однонаправленность движения основных потоков промывочной жидкости и механической эвакуации шлама зубьями вооружения шарошек;
- с боковой (симметричной и асимметричной) гидромониторной промывкой и косозубым вооружением, оснащенная боковыми гидромониторными асимметричными шестигранными насадками конфузорного типа и разнонаправленным косозубым вооружением, обеспечивающим однонаправленность движения основных потоков промывочной жидкости и механической эвакуации шлама зубьями вооружения инструмента;

2 Разработана новая форма зубьев вооружения ведомых венцов шарошечного бурового инструмента, обладающая более рациональной геометрией вооружения, работающего в режиме пробуксовки или подтормаживания, позволяющая повысить проходку и механическую скорость бурения.

3 Разработано несколько новых конструкций косозубого вооружения шарошек, позволяющих исключить или свести к минимуму возможность возникновения эффекта рейкообразования в течение всего времени работы бурового инструмента.

4 Разработана новая конструктивная схема наддолотного шарошечного расширителя с разнонаправленным косозубым вооружением, обладающая большей разрушающей способностью вооружения и лучшим гидравлическим совершенством с точки зрения удаления шлама с поверхности кольцевого забоя расширяемой скважины, позволяющая повысить проходку и механическую скорость бурения стволов большого диаметра.

5 Разработаны несколько новых конструктивных схем шарошечных долот для разбуривания пород различных категорий твердости способом реактивно-турбинного бурения, основными отличительными чертами которых являются: косозубое вооружение шарошек, нижняя образующая (или ее основная часть) каждой шарошки расположена перпендикулярно по отношению к оси вращения агрегата, т. е. образует поверхность плоского горизонтального забоя; угловая поверхность между образующей периферийного венца и калибрующего конуса шарошек выполнена с таким расчетом, чтобы не только калибровать стенки скважины, но и успешно разрушать породу забоя.

6 Промышленные испытания опытных образцов всех новых конструкций различного шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением показали их работоспособность и эффективность при различных способах бурения.

7 Проведенные промышленные испытания опытных образцов экспериментальных долот П490С-ЦВР-1 с разноориентированным зубчатым центробежно-армированным вооружением в условиях РТБ сопровождаются значительным уменьшением вибрации исполнительного органа РТБ. Это приводит к снижению знакопеременных динамических нагрузок на вооружение, повышая его долговечность, и увеличению ресурса опорных узлов экспериментальных долот. При этом косозубое вооружение увеличивает суммарную площадь поражения забоя и за счет этого повышает механическую скорость и проходку на инструмент.

8 Основные технико-экономические показатели бурения, такие как проходка, механическая скорость бурения и стойкость вооружения опытных долот П490С-ЦВР-1, существенно превосходят аналогичные показатели серийных долот П490С-ЦВР: по проходке на 46 %, механической скорости бурения на 20 %;

9 Промышленные испытания опытной партии шарошечных буровых долот П490ТЗ-ЦВР-9 в промышленных условиях подтвердили правильность конструкторских решений, принятых на основе проведенных в работе исследований, установивших, что несмотря на то, что периферийный венец шарошек в условиях РТБ участвует не только в калибровании стенки ствола, но и в разрушении породы забоя, вершинные венцы не в меньшей степени участвуют в процессе углубления скважины. Экспериментальные долота П490ТЗ-ЦВР-9 с шарошками, оснащенными многовенцовым твердосплавным вооружением, вершинные венцы которого образуют плоский забой, в сравнении с серийными долотами П490ТЗ-ЦВР позволили увеличить проходку и механическую скорость бурения более чем в 2 раза.

10 Испытания опытных образцов шарошечных буровых долот П295,3М-ЦГВ с разнонаправленным косозубым вооружением по сравнению с базовой конструкцией серийных долот П295,3М-ЦГВ с прямозубым вооружением показали увеличение механической скорости бурения на 19 %;

11 Промышленные испытания опытных образцов шарошечных буровых долот Ш490С-ЦВ и Ш393,7С-ЦВ, оснащенных центральными гидромониторными насадками диффузорного типа с асимметричным шестигранным внутренним поперечным сечением при роторном способе бурения показали увеличение механической скорости бурения в сравнении со своими аналогами, оснащенными насадками с круглым поперечным сечением, на 7 – 9 %;

12 Промышленные испытания экспериментальных шарошечных расширителей БРШ-555М совместно с пилотными опытными долотами Ш295,3М-ГВ с разнонаправленным косозубым вооружением в сравнении со своими базовыми аналогами с прямозубым вооружением при роторном способе бурения верхних интервалов двух скважин показали увеличение механической скорости бурения на 19 – 23 %.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1 Проведенные в работе исследования позволили повысить эффективность работы различного шарошечного бурового инструмента за счет разработки новых конструкций косозубого вооружения, обладающего большей разрушающей способностью и прочностью, а также элементов промывочных систем, позволяющих существенно повысить очистку как инструмента, так и всей призабойной зоны в целом.

2 Созданы математические модели процессов «перекатывания» шарошек различных буровых инструментов при разных способах бурения. На их основе определены геометрические параметры вооружения, обеспечивающие повышенную эффективность работы шарошечного инструмента при бурении пород различной твердости.

3 Разработана методика определения положения мгновенной оси вращения шарошки бурового инструмента, позволяющая выявлять координаты ведущего венца и рассчитывать величины проскальзывания ведомых венцов вооружения.

4 Создана математическая модель силового взаимодействия зубчатого вооружения шарошек с забоем, позволившая установить, что придание зубьям ведомых венцов асимметричной формы способствует не только существенному уменьшению нагрузок, необходимых для успешного разрушения породы, но и снижению напряженно-деформируемого состояния зубьев в процессе работы инструмента.

5 Исследовано влияние отклоняющих и стабилизирующих сил, возникающих при работе инструмента с косозубым вооружением, позволившее разработать конструктивные схемы косозубого вооружения шарошечного бурового инструмента, обеспечивающие минимальную вероятность отклонения от заданного направления бурения.

6 Осуществлено математическое моделирование процесса центробежного объемного армирования косозубого асимметричного вооружения бурового инструмента, позволяющее определить параметры процесса центробежного армирования в зависимости от геометрии вооружения, или решать обратную задачу, при этом обеспечивая необходимое качество армирования. Также на его основе были определены геометрические параметры зоны армирования, обеспечивающей повышенную стойкость зубьев вооружения шарошек к знакопеременным ударным нагрузкам.

7 Разработаны методики определения модуля упругости и допускаемого напряжения при изгибе износостойких композиционных материалов, используемых для упрочнения вооружения шарошечного бурового инструмента.

8 Разработана методика расчета зубьев вооружения шарошечного бурового инструмента на прочность, основанная на методе конечных элементов, позволяющая определять наи-

более нагруженные участки зубчатого симметричного и асимметричного вооружения при различных вариантах приложения нагрузки.

9 Проведены исследования истечения промывочной жидкости из фасонных гидромониторных насадок, которые позволили установить, что с помощью изменения геометрических параметров внутреннего поперечного сечения насадок можно управлять направлением и силой гидравлического потока без существенных конструктивных изменений как самого узла, так и бурового инструмента в целом. На основе этих исследований были разработаны конструктивные схемы центрального и бокового гидромониторных узлов, а также варианты их размещения в шарошечном буровом инструменте.

10 Впервые проведены исследования, позволившие определить влияние вращающегося косозубого вооружения шарошечного бурового инструмента на гидравлическую среду забоя. На их основе были разработаны несколько конструкций шарошечного бурового инструмента с различными схемами промывки.

11 На основе исследований кинематических характеристик различных венцов шарошек и особенностей процесса разрушения забоя были разработаны несколько вариантов геометрии косозубого вооружения шарошек как для ведущих, так ведомых венцов вооружения, предотвращающих образование забойной реки в течение всего цикла работы инструмента.

12 Разработаны и изготовлены опытные образцы различного шарошечного бурового инструмента, такие как: шарошечные долота для реактивно-турбинного бурения Ш490С-ЦВР-1 с разноориентированным центробежно-объемно-армированным зубчатым вооружением, Ш490ТЗ-ЦВР-9 с твердосплавным разнонаправленным зубчатым вооружением, трехшарошечные долота Ш295,3М-ЦГВ с разнонаправленным косозубым вооружением, Ш295,3М-ГВ, оснащенные гидромониторными насадками конфузорного типа с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением, Ш393,7С-ЦВ, Ш490С-ЦВ, оснащенные центральными гидромониторными насадками диффузорного типа с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением, шестишарошечный расширитель БРШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением.

13 Промышленные испытания опытных образцов всех новых конструкций различного шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением, а также элементов промывочных систем, показали их высокую работоспособность и эффективность при различных способах бурения. Некоторые из них были внедрены, другие рекомендованы к внедрению на различных предприятиях нефтегазовой отрасли.



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

- 1 Абдулин М.М. Кинематика шарошечного долота / М.М. Абдулин, Б.Н. Трушкин, А.И. Спивак // Известия высших учебных заведений, «Нефть и газ». - 1981. - №11. С. 35-41.
- 2 Авт. свид. 91126 СССР: E21B 10/16. Долото для бурения скважин / Ф.Ф. Панасенко, А.И. Родионов, С.И. Шубович. - № 432439, заявл. 31.07.1950, опубл. 1950.
- 3 Авт. свид. 86957 СССР: E21B 10/08. Долото для бурения скважин / О.Я. Айзедман, В.А. Мешков, А.Н. Пименов. - № 412437, заявл. 15.02.1950, опубл. 1950.
- 4 Авт. свид. 90470 СССР: E21B 10/16. Долото для бурения скважин / В.А. Мешков, О.Я. Айзедман, А.Н. Пименов. - № 431041, заявл. 05.07.1950, опубл. 1950.
- 5 Авт. свид. 1808964 СССР: E21B 10/16. Породоразрушающий элемент бурового долота и способ его изготовления / В.А. Ясагин, А.Н. Николаев, Д.Ю. Сериков и др. - № 4887002/02, заявл. 04.12.1990, опубл. 15.04.1993.
- 6 Агошашвили Т.Г. К вопросу о скольжении на забое при бурении шарошечными долотами / Т.Г. Агошашвили. - М.: ВНИИБТ. - 1967. - Вып.17. - С. 133-144.
- 7 Агошашвили Т.Г. Качественный анализ величин скольжений в долотах со смещенными осями шарошек. Теория и техника бурения / Т.Г. Агошашвили. М.: ВНИИБТ. - 1967. - Вып.17. - С. 144-154.
- 8 Агошашвили Т.Г. Лабораторные исследования долот с заданным скольжением венцов шарошек на забое. Буровые долота / Т.Г. Агошашвили, А.С. Мокшин, В.В. Афония. - Труды ВНИИБТ, 1969. - Вып.2. - С. 3-17.
- 9 Адлер В.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / В.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. - М.: Наука, 1971. - 284 с.
- 10 Барон Л.И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами / Л.И. Барон, Л.Б. Глатман, С.Л. Загорский. - М.: Наука, 1969. - С. 151-154.
- 11 Бикбулатов И.К. Исследование гидроабразивного изнашивания щелевидных отверстий: дис. ...канд. техн. наук / Бикбулатов Ирек Камилевич. - М., 1972. - С. 62-68.
- 12 Бингхэм М.Г. Новое в проблеме буримости горных пород / М.Г. Бингхэм. - М.: Недра, 1967. - 213 с.
- 13 Богомоллов Р.М. Методы повышения эффективности разрушения горных пород при бурении шарошечными долотами: дис. ...докт. техн. наук. 25.00.15 / Богомоллов Родион Михайлович. - М., 2001. - 434 с.

- 14 Богомолов Р.М. Буровой инструмент. Энциклопедия изобретений (1916-2016 гг.). Часть 1 / Р.М. Богомолов, Н.В. Носов. - М.: Инновационное машиностроение, 2015. - 399 с.
- 15 Богомолов Р.М. Совершенствование технологии обработки и сборки буровых шарошечных долот / Р.М. Богомолов, Н.В. Носов, С.М. Крылов, В.И. Кремлев. - М.: Машиностроение, 2013. - 227 с.
- 16 Бугай Ю.Н. Исследование технологии изготовления заготовок шарошек буровых долот центробежной отливкой с объемно-армированным вооружением и вплавленной опорой: дис. ...канд. техн. наук. 05.02.08 / Бугай Юрий Николаевич. - М, 1976. - 308 с.
- 17 Бугай Ю.Н. Центробежно-армированный породоразрушающий буровой инструмент / Ю.Н. Бугай, И.В. Воробьев. - Львов: Выща школа, 1989. - 205 с.
- 18 Буримов Ю.Г. Бурение верхних интервалов глубоких скважин большого диаметра / Ю.Г. Буримов, А.С. Копылов, А.В. Орлов. - М.: Недра, 1975. - 232 с.
- 19 Варламов Е.П. Влияние ориентации зубьев шарошек на работоспособность буровых долот и очистку забоя скважины / Е.П. Варламов, Э.К. Бикбулатов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 1995. - №7-8. - С. 16-18.
- 20 Васильев А.В. Совершенствование схем промывочных устройств гидромониторных долот: дис. ...канд. техн. наук: 05.04.07 / Васильев Анатолий Васильевич. - М., 1982. - 205 с.
- 21 Виноградов В.Н. Ударно-абразивный износ долотной стали и повышение долговечности буровых шарошечных долот: дис. ...докт. техн. наук. 05.02.04 / Виноградов Владимир Николаевич. - М, 1969. - 248 с.
- 22 Виноградов В.Н. Долговечность буровых долот / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, А.Н. Пашков, В.М. Рубарх. - М.: Недра, 1977. - 256 с.
- 23 Владимиров А.И. Конкурентоспособность и проблемы нефтегазового комплекса / А.И. Владимиров, В.Я. Кершенбаум. - М.: Национальный институт нефти и газа, 2004. - 637 с.
- 24 Гаек Я., Шидак Э. Теория ранговых критериев. - М.: Наука. - 1971. - С. 58-64.
- 25 Гарньер А.Х. Факторы, влияющие на механическую скорость проходки с увеличением глубины / А.Х. Гарньер, Н.Х. Ван-Линген. - М.: Госинти. - перевод №186/606. - 1960. - С. 37-41.
- 26 ГОСТ 12344-66, ГОСТ 12365-66. Стандарты стали: легированные и высоколегированные. Методы химического анализа. - М.: Изд-во Стандартов, 1967. - С. 16.

- 27 Гусман А.М. Влияние промывочного агента, масштабного фактора, конструктивных особенностей шарошечного долота и формы забоя на процесс выноса шлама из зоны долота. Гидравлика в бурении / А.М. Гусман. - М.: Труды ВНИИБТ, 1979. - Вып.48. - С. 65-71.
- 28 Гусман А. М. Исследование процесса выноса шлама из призабойной зоны при различных схемах промывочных устройств шарошечных долот: дис. ...канд. техн. наук: 05.15.10 / Гусман Александр Михайлович. - М., 1973. -С. 42-50.
- 29 Гусман А.М. Экспериментальное исследование влияния схемы и режима промывки забоя на вынос шлама из зоны долота. Гидравлика в бурении / А.М. Гусман, Б.И. Мительман. - М.: Труды ВНИИБТ, 1979. - Вып.48. - 161 с.
- 30 Жидовцев Н.А. Влияние схемы размещения насадок в долоте на качество очистки забоя / Н.А. Жидовцев, Г.И. Матвеев, И.К. Бикбулатов // Нефтяное хозяйство. - 1975. - №5. - С. 21-25.
- 31 Жидовцев Н.А. Совершенствование схем промывки буровых долот / Н.А. Жидовцев // Нефтяное хозяйство. - 1980. - №7. - С. 20-24.
- 32 Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике / О.С. Зенкевич. - М.: Мир, 1975. - 543 с.
- 33 Иванов С.В. Исследование основных физико-механических свойств и разработка оптимального состава армирующего сплава для калибрующей поверхности шарошек буровых долот: авт. дис. ...канд. техн. наук. - М., 1975. - С. 23-25.
- 34 Ильский А.Л. Расчет и конструирование бурового оборудования / А.Л. Ильский, Ю.В. Миронов, А.Г. Чернобыльский. - М.: Недра, 1985. - 420 с.
- 35 Ищук А.Г. Нефтепромысловое оборудование «Волгабурмаш». Каталог-справочник / А.Г. Ищук, В.Г. Неупокоев. - Хельсинки, Финляндия. -: Design Studio. - 1996. С.37-42.
- 36 Калинин Г.В. Опыт создания трехшарошечного долота с разнозначным смещением осей шарошек в плане / Г.В. Калинин, Б.Л. Стеглянов, А.И. Ильковский, Н.А. Биланенко, В.М. Карагезя, Р.А. Абдуллаев. - Ташкент: Тр. ВНШЭГазпрома. - 1978. - Вып. 15. - С 45-51.
- 37 Кершенбаум В.Я. Буровой породоразрушающий инструмент. Том.1 Шарошечные долота / В.Я. Кершенбаум, А.В. Торгашев, А.Г. Мессер. - М.: Наука и техника, 2003. - 250 с.
- 38 Кожевников Д.В. Режущий инструмент / Д.В. Кожевников, В.А. Гречишников, С.В. Кирсанов и др. - М.: Машиностроение. - 2014. - 520 с.

- 39 Креймер Г.С. Прочность твердых сплавов / Г.С Креймер. - М.: Metallurgia. - 1966. - 200 с.
- 40 Крылов К.А. Повышение долговечности зубчатого вооружения буровых долот: дис. ...докт. техн. наук: 05.04.07 / Крылов Константин Алексеевич. - М., 1977. - 321 с.
- 41 Крылов К.А. Повышение долговечности и эффективности буровых долот / К.А. Крылов, О.А. Стрельцова. - М.: Недра, 1983. - 206 с.
- 42 Леонов Е.Г. Гидроаэромеханика в бурении / Е.Г. Леонов, В.И. Исаев. - М.: Недра, 1987. - 304 с.
- 43 Леонов Е.Г. Применение ЭВМ для гидравлических расчётов промывки скважин при бурении / Е.Г. Леонов, В.И. Исаев, Ю.Н. Пономарёв. - М.: МИНХ и ГП им. И.М. Губкина. - 1980. Вып. 152. - С. 137-160.
- 44 Мавлютов М.Р. Разрушение горных пород при бурении скважин / М.Р. Мавлютов. - М.: Недра, 1979. - 210 с.
- 45 Макаров Н.Г. Анализ совершенствования промывочных систем буровых шарошечных долот / Н.Г. Макаров, В.А. Ясашин, Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2001. - №12. - С. 6-10.
- 46 Масленников И.К. Инструмент для бурения скважин. Справочное пособие / И.К. Масленников, Г.И. Матвеев. - М.: Недра, 1981. - 335 с.
- 47 Матюшин П.И. Влияние шлама на разрушение породы и механизм очистки забоя скважины при бурении шарошечными долотами: авт. дис. ...канд. техн. наук. - Уфа, 1972. - С. 46-47.
- 48 Мокшин А.С. Шарошечные долота / А.С. Мокшин, Ю.Е. Владиславлев, Э.Л. Комм. - М.: Недра, 1971.- 216 с.
- 49 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ-Г-7-002-86. - М.: Атомэнергоиздат, 1989. - С 45-49.
- 50 Палий П.А. Буровые долота. Справочник / П.А. Палий, К.Е. Корнеев. - М.: Недра, 1971. - 445 с.
- 51 Пат. 2334862 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое долото / Р.М. Богомолов, Н.М. Панин и др. - № 2007102013/03, заявл. 19.01.2007, опубл. 27.09.2008.
- 52 Пат. 2046176 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое шарошечное долото / Б.П. Балабашин, Э.К. Бикбулатов, Э.С. Гинзбург и др. . - № 5044109/03, заявл. 26.05.1992, опубл. 20.10.1995.
- 53 Пат. 2090732 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Шарошечное долото для реактивно-турбинного бурения / В.А. Ясашин, Н.Г. Макаров, А.М. Назаров, Д.Ю. Сериков и др. - № 94045572/03, заявл. 29.12.1994, опубл. 20.09.1997.

54 Пат. 2585315 Российская Федерация: МПК E21B 10/60. Промывочный узел бурового долота / А.А. Молчанова, В.А. Ясагин, Д.Ю. Сериков и др. - № 2015109688/03, заявл. 20.03.2015, опубл. 27.05.2016.

55 Пат. 2598250 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое шарошечное долото / Д.Ю. Сериков. - № 2015150565/03, заявл. 26.11.2015, опубл. 20.09.2016.

56 Пат. 2552242 Российская Федерация: МПК E21B 10/18. Буровое гидромониторное шарошечное долото / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. Б.И. - № 2014120710/03, заявл. 23.05.2014, опубл. 10.06.2015.

57 Пат. 2169822 Российская Федерация: МПК E21B 7/28. Шарошечный расширитель / В.А. Ясагин, Н.Г. Макаров, А.М. Назаров, Д.Ю. Сериков. - № 2000129343/03, заявл. 24.11.2000, опубл. 27.06.2001.

58 Пат. 2555850 Российская Федерация: МПК E21B 10/18. Буровое шарошечное долото (варианты) / В.А. Ясагин, Д.Ю. Сериков, Н.М. Панин.. - № 2014123701/03, заявл. 11.06.2014, опубл. 10.07.2015.

59 Пат. 2148146 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Шарошка бурового долота / В.А. Ясагин, Н.Г. Макаров, А.М. Назаров, Д.Ю. Сериков. - № 99114168/03, заявл. 05.07.1999, опубл. 27.04.2000.

60 Пат. 2281373 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Шарошка бурового долота / Н.М. Панин, Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин и др. - № 2005111850/03, заявл. 21.04.2005, опубл. 10.08.2006.

61 Пат. 2394145 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое шарошечное долото с центральной промывкой / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2009124060/03, заявл. 24.06.2009, опубл. 10.07.2010.

62 Пат. 2394146 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое гидромониторное шарошечное долото / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2009124059/03, заявл. 24.06.2009, опубл. 10.07.2010.

63 Пат. 2425945 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое трехшарошечное долото / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2010131703/03, заявл. 29.07.2010, опубл. 10.08.2011.

64 Пат. 2427700 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое шарошечное долото / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2010131704/03, заявл. 29.07.2010, опубл. 27.08.2011.

65 Пат. 2492310 Российская Федерация: МПК E21B 10/60. Промывочный узел бурового долота / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2012119014/03, заявл. 11.05.2012, опубл. 10.09.2013.

66 Пат. 2473770. Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое шарошечное долото / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 201140286/03, заявл. 05.10.2011, опубл. 27.01.2013.

67 Пат. 2505660 Российская Федерация: МПК E21B 10/60. Промывочный узел бурового долота / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Р.М. Богомолов, Н.М. Панин. - № 2012141487/03, заявл. 28.09.2012, опубл. 27.01.2014.

68 Пат. 2503791 Российская Федерация: МПК E21B 10/60. Промывочный узел бурового долота / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Р.М. Богомолов, Н.М. Панин. - № 2012141485/03, заявл. 28.09.2012, опубл. 10.01.2014.

69 Пат. 2507364 Российская Федерация: МПК E21B 10/60. Промывочный узел бурового долота (варианты) / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин и др. - № 2012143279/03, заявл. 10.10.2012, опубл. 20.02.2014.

70 Пат. 2507365 Российская Федерация: МПК E21B 10/60. Промывочный узел бурового долота / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Р.М. Богомолов, Н.М. Панин. - № 2012145180/03, заявл. 24.10.2012, опубл. 20.02.2014.

71 Пат. 2509201 Российская Федерация: МПК E21B 10/60. Промывочный узел бурового долота / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Р.М. Богомолов, Н.М. Панин. - № 2012153804/03, заявл. 13.12.2012, опубл. 10.03.2014.

72 Пат. 2520656 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое шарошечное долото с асимметричной схемой промывки / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2013123770/03, заявл. 24.05.2013, опубл. 27.06.2014.

73 Пат. 2520974 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое шарошечное долото / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2013119919/03, заявл. 30.04.2013, опубл. 27.06.2014.

74 Пат. 2522608 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое шарошечное долото / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2013130681/03, заявл. 05.07.2013, опубл. 20.07.2014.

75 Пат. 2543760 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое шарошечное долото / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2014103702/03, заявл. 05.02.2014, опубл. 10.03.2015.

76 Пат. 2543823 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое шарошечное долото / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2014103700/03, заявл. 05.02.2014, опубл. 10.03.2015.

77 Пат. 2543824 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое шарошечное долото / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2014103701/03, заявл. 05.02.2014, опубл. 10.03.2015.

78 Пат. 2543828 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Буровое шарошечное долото / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2014120711/03, заявл. 23.05.2014, опубл. 10.03.2015.

79 Пат. 2558030 Российская Федерация: МПК E21B 10/18. Буровое долото / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2014130566/03, заявл. 24.07.2014, опубл. 27.07.2015.

80 Пат. 2567561 Российская Федерация: МПК E21B 10/18. Буровое гидромониторное шарошечное долото / Д.Ю. Сериков. - № 2014146698/03, заявл. 21.11.2014, опубл. 10.11.2015.

81 Пат. 2579087 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Долото для реактивно-турбинного бурения / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, А.А. Молчанова, Н.М. Панин. - № 2015106648/03, заявл. 27.02.2015, опубл. 27.03.2016.

82 Пат. 2600225 Российская Федерация: МПК E21B 10/20. Шарошечный расширитель / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, Н.М. Панин. - № 2014130568/03, заявл. 24.07.2014, опубл. 20.10.2016.

83 Пат. 2611776 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Долото для реактивно-турбинного бурения / Д.Ю. Сериков. - № 2016102413, заявл. 27.01.2016, опубл. 01.03.2017.

84 Пат. 2620108 Российская Федерация: МПК E21B 10/16. Долото для реактивно-турбинного бурения / Д.Ю. Сериков, А.А. Молчанова, Н.М. Панин. - № 2016106655, заявл. 26.02.2016, опубл. 23.05.2017.

85 Победря Б.Е. Механика композиционных материалов / Б.Е. Победря. - М.: Изд-во МГУ, 1984. - 310 с.

86 Позднышев В.И. Исследование нагруженности и несущей способности призматических зубьев шарошечных долот: дис. ...канд. техн. наук: 05.04.07 / Позднышев Вячеслав Николаевич. - М., 1974. - 210 с.

87 Поляков В.С. Увеличение работоспособности шарошечных долот с повышенным скольжением породоразрушающих элементов / В.С. Поляков, П.А. Палий, А.С. Мокшин, В.А. Коротков // Нефтяное хозяйство. - 1971. - №5. - С. 34-38.

88 Поросенков А.П. Влияние ориентации зубков шарошечного долота на процесс и эффективность разрушения горных пород при бурении скважин: дис. ...канд. техн. наук: 01.04.07; 05.15.03 / Поросенков Александр Павлович. - М., 1974. - С. 177.

89 Реактивно-турбинное бурение. Труды ВНИИБТ. Вып.18. - М. Недра. 1967. - С. 2-48.

- 90 Рубарх В.М. Закономерности разрушения зубьев шарошечных долот и пути повышения их долговечности: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.04 / Рубарх Владимир Михайлович. - М., 1971. - С. 132.
- 91 Симонов В.В. Работа шарошечных долот и их совершенствование / В.В. Симонов, В.Г. Выскребцов. - М.: Недра, 1975. - 240 с.
- 92 Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. - М.: Мир, 1979. - 392 с.
- 93 Сериков Д.Ю. Разработка конструкции и технологии изготовления бурового инструмента для РТБ с центробежно-объемно-армированным вооружением: дис. ...канд. техн. наук: 05.04.07 / Сериков Дмитрий Юрьевич. - М., 1992. - 147 с.
- 94 Сериков Д.Ю. Повышение эффективности шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением / Д.Ю. Сериков. - М.: Нефть и газ, 2015. - 379 с.
- 95 Сериков Д.Ю. Шарошечные долота для реактивно-турбинного бурения / Д.Ю. Сериков. - М.: Нефть и газ, 2016. - 240 с.
- 96 Сериков Д.Ю. Технология изготовления корпусных шарошечных долот со сменными секциями / Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2016. - №5. - С. 34-36.
- 97 Сериков Д.Ю. Сравнительный анализ статической прочности прямозубого и косозубого поверхностно-армированного вооружения / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясашин, Р.Ф. Гаффанов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. - 2013. - №4. - С. 31-35.
- 98 Сериков Д.Ю. Промышленные испытания перспективных конструкций шарошечных долот в условиях реактивно-турбинного бурения / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясашин, А.М. Назаров // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, - 2017. - №2. - С. 16-19.
- 99 Сериков Д.Ю. Повышение эффективности работы шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясашин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2014. - №1. - С. 29.
- 100 Сериков Д.Ю. Анализ конструкций шарошечных буровых долот с косозубым вооружением / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясашин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2014. - №1. - С. 28.
- 101 Сериков Д.Ю. Исследование проскальзывания косозубого вооружения шарошечных буровых долот при бурении мягких пород / Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2014. - №2. - С. 4-6.



102 Сериков Д.Ю. Совершенствование конструкций шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением / Д.Ю. Сериков // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2014. - №2. - С. 33.

103 Сериков Д.Ю. Анализ напряженного состояния центробежно-объемно-армированного косозубого вооружения при бурении пород средней твердости / Д.Ю. Сериков, Р.Ф. Гаффанов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2014. - №3. - С. 22.

104 Сериков Д.Ю. Повышение качества проектирования вооружения бурового инструмента / Д.Ю. Сериков, К.А. Пиканов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. - 2014. - №1. - С. 21-23.

105 Спиридонов С.В. Методика проектирования геометрии вооружения шарошечного бурового инструмента на основе математического моделирования / С.В. Спиридонов, Д.Ю. Сериков // Сфера нефть и газ, 2017. - №1. - С. 18-23.

106 Сериков Д.Ю. Исследование процесса проскальзывания зубьев вооружения шарошечных буровых долот / Д.Ю. Сериков // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2014. - №2. - С. 14-18.

107 Сериков Д.Ю. Методика определения положения мгновенной оси вращения шарошки бурильного инструмента / Д.Ю. Сериков, К.А. Пиканов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2014. - №5. - С. 20-23.

108 Сериков Д.Ю., Совершенствование способов крепления промывочных узлов бурильного инструмента / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясашин, Н.М. Панин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2014. - №6. - С. 6-12.

109 Сериков Д.Ю. Повышение качества центробежно-объемно-армированного косозубого вооружения бурового инструмента / Д.Ю. Сериков // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. - 2014. - №2. - С. 21-23.

110 Сериков Д.Ю. Совершенствование конструкций вооружения шарошечного бурового инструмента с целью минимизации эффекта рейкообразования / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясашин, Н.М. Панин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2014. - №3. - С. 4-8.

111 Сериков Д.Ю. Совершенствование способов крепления твердосплавных зубков в бурильном инструменте / Д.Ю. Сериков, Н.М. Панин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2014. - №7. - С. 30-32.

112 Сериков Д.Ю. Анализ циклической прочности центробежно-объемно-армированного бурильного инструмента / Д.Ю. Сериков, Р.Ф. Гаффанов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2014. - №8. - С. 4-7.

- 113 Сериков Д.Ю. Сравнительный анализ напряженного состояния симметричных и асимметричных зубьев центробежно-объемно-армированного косозубого вооружения / Д.Ю. Сериков, Р.Ф. Гаффанов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2014. - №7. - С. 19-21.
- 114 Сериков Д.Ю. Анализ напряженного состояния центробежно-объемно-армированного косозубого вооружения ведомых венцов шарошечного бурового инструмента / Д.Ю. Сериков, Р.Ф. Гаффанов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2014. - №4. - С. 8-11.
- 115 Сериков Д.Ю. Анализ гидродинамики работы прямозубого и косозубого вооружения шарошечных буровых долот / Д.Ю. Сериков, Д.В. Сморкалов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. - 2014. - №3. - С. 54-57.
- 116 Сериков Д.Ю. Совершенствование геометрии вооружения шарошечных буровых долот с боковой гидромониторной промывкой / Д.Ю. Сериков // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2014. - №8. - С. 18.
- 117 Сериков Д.Ю. Совершенствование геометрии вооружения шарошечных буровых долот с центральной промывкой / Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2014. - №9. - С. 16.
- 118 Сериков Д.Ю. Совершенствование геометрии вооружения шарошечных расширителей / Д.Ю. Сериков // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2014. - №10. - С. 18-22.
- 119 Сериков Д.Ю. Совершенствование косозубого вооружения ведущих венцов шарошек бурового инструмента / Д.Ю. Сериков, К.А. Пиканов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2014. - №5. - С. 6-8.
- 120 Сериков Д.Ю. Совершенствование геометрии вооружения буровых долот для бурения мягких пород / Д.Ю. Сериков, К.А. Пиканов // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2014. - №11. - С. 19-23.
- 121 Сериков Д.Ю. Анализ работы шарошечного бурового инструмента при бурении мягких и средних пород / Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2014. - №12. - С. 22-28.
- 122 Сериков Д.Ю. Совершенствование центрального промывочного узла трехшарошечного бурового долота / Д.Ю. Сериков, Д.В. Сморкалов // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2014. - №12. - С. 20-25.
- 123 Сериков Д.Ю. Исследование проскальзывания косозубого вооружения шарошечных долот при бурении средних пород / Д.Ю. Сериков // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - 2014. - №12. - С.37.

124 Сериков Д.Ю. Совершенствование геометрии зубчатого вооружения ведомых венцов шарошечных буровых долот / Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2015. - №1. - С. 25-29.

125 Сериков Д.Ю., Совершенствование геометрии вооружения шарошечных буровых долот с боковой асимметричной промывкой / Д.Ю. Сериков, А.В. Васильев // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2015. - №1. - С. 21-27.

126 Сериков Д.Ю. Совершенствование геометрии вооружения ведомых венцов шарошечного бурового инструмента / Д.Ю. Сериков // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2015. - №2. - С. 25-31.

127 Сериков Д.Ю. Совершенствование геометрии вооружения шарошечных буровых долот для бурения пород средней твердости / Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2015. - №3. - С. 35-40.

128 Сериков Д.Ю. Совершенствование шарошечного бурового инструмента с боковой гидромониторной системой промывки / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясагин, И.К. Бикбулатов, Д.В. Сморгалов // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2015. - №4. - С. 25-31.

129 Сериков Д.Ю. Повышение эффективности бурового инструмента, предназначенного для реактивно турбинного бурения / Д.Ю. Сериков // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2015. - №2. - С. 21-27.

130 Сериков Д.Ю. Совершенствование геометрии вооружения ведомых венцов шарошечного бурового инструмента / Д.Ю. Сериков // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2015. - №2. - С. 25-31.

131 Сериков Д.Ю.. Исследование отклоняющих и стабилизирующих сил, возникающих при работе косозубого вооружения шарошечного бурового инструмента / Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2015. - №9. - С. 30-32.

132 Сериков Д.Ю. Повышение качества центробежно-объемно-армированного асимметричного косозубого вооружения шарошечного бурового инструмента / Д.Ю. Сериков // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2015. - №9. - С. 20-26.

133 Сериков Д.Ю. Шестишарошечное долото большого диаметра с твердосплавным вооружением для РТБ / Д.Ю. Сериков // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2016. - №4. - С. 20-25.

134 Сериков Д.Ю. Сборно-разборное шарошечное долото большого диаметра для РТБ / Д.Ю. Сериков // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2016. - №4. - С. 12-18.

135 Сериков Д.Ю. Совершенствование вооружения ведущих венцов шарошек буровых долот / Д.Ю. Сериков // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2016. - №11. - С. 34-40.

136 Сериков Д.Ю. Совершенствование геометрии вооружения шарошечных расширителей / Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2017. - №1. - С. 20-24.

137 Сериков Д.Ю. Особенности кинематики многошарошечных долот большого диаметра в условиях реактивно-турбинного бурения / Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2017. - №2. - С. 25-28.

138 Сериков Д.Ю. Методики определения физико-механических характеристик армирующего композиционного материала, используемого для упрочнения вооружения шарошечного бурового инструмента / Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2016. - №12. - С. 29-32.

139 Сериков Д.Ю. Анализ конструкций и технологий изготовления твердосплавного вооружения шарошечных буровых долот / Д.Ю. Сериков // Сфера нефть и газ. - 2017. - №1. - С. 30-35.

140 Сериков Д.Ю. Совершенствование боковых гидромониторных насадок шарошечных буровых долот / Д.Ю. Сериков // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2017. - №1. - С. 9-14.

141 Сериков Д.Ю. Промышленные испытания перспективных конструкций шарошечных долот в условиях реактивно-турбинного бурения / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясашин, А.М. Назаров // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2017. - №2. - С. 16-19.

142 Сериков Д.Ю. Совершенствование бурового инструмента для реактивно турбинного бурения / Д.Ю. Сериков // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2015. - №5. - С. 38-45.

143 Сериков Д.Ю. Анализ конструктивных особенностей систем промывки шарошечных буровых долот и их влияния на качество очистки забоя скважины / Д.Ю. Сериков, А.А. Васильев // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2015. - №3. - С. 27-32.

144 Сериков Д.Ю.. Совершенствование бурового инструмента для реактивно турбинного бурения мягких пород / Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2015. - №7. - С. 7-13.

145 Сериков Д.Ю. Повышение эффективности разрушения средних и твердых пород за счет использования косозубого вооружения шарошек / Д.Ю. Сериков, Э.С. Гинзбург // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2015. - №4. - С. 18-22.

146 Сериков Д.Ю. Исследование истечения струи из насадок с асимметричным поперечным сечением / Д.Ю. Сериков, В.И. Исаев, Д.В. Сморкалов // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2015. - №12. - С. 56-63.

147 Сериков Д.Ю. Повышение эффективности шарошечных буровых долот для реактивно турбинного бурения / Д.Ю. Сериков // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2016. - №3. - С. 40-47.

148 Сериков Д.Ю. Анализ конструкций промывочных систем шарошечных долот / Д.Ю. Сериков, В.А. Ясашин, В.Н. Агеева // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2016. - №2. - С. 8-14.

149 Сериков Д.Ю. Пути повышения эффективности работы гидромониторных шарошечных долот / Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2016. - №6. - С. 15-19.

150 Сериков Д.Ю. Особенности промывки скважин и инструмента при реактивно-турбинном бурении / Д.Ю. Сериков // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2016. - №3. - С. 21-27.

151 Сериков Д.Ю. Исследование проскальзывания вооружения шарошечных буровых долот / Д.Ю. Сериков, А.М. Гринев // Территория «НЕФТЕГАЗ». - 2016. - №7-8. - С. 20-27.

152 Сериков Д.Ю. Исследование влияния геометрии зубчатого вооружения шарошек на гидравлическую среду / Д.Ю. Сериков, А.Н. Шарапов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2017. - №4. - С. 47-52.

153 Сериков Д.Ю. Анализ технологий изготовления стального армированного вооружения шарошечных буровых долот / Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2017. - №4. - С. 8-15.

154 Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. Учебное пособие для магистров / Н.И. Сидняев. Издание 2. - М: Издательство «Юрайт», 2014. - 163 с.

155 Сорокин Г.М. Исследование ударного износа: дис. ...докт. техн. наук. - М., 1972. - С. 434.

156 Спиридонов С.В. Математическое моделирование процесса износа вооружения бурильного инструмента / С.В. Спиридонов, Д.Ю. Сериков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2014. - №10. - С. 37.

157 Спиридонов С.В., Сериков Д.Ю. Методика определения геометрических параметров вооружения бурового инструмента на основе математического моделирования /

С.В. Спиридонов, Д.Ю. Сериков // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2014. - №6. - С. 29-33.

158 Способы армирования шарошек буровых долот и бурильных головок твердым сплавом релит. Технические требования, правила и нормы приемки. РД 39-2-92-78. - М., 1978. - С. 34-39.

159 Справочник металлиста / Под ред. А.Г. Рахштадта, В.А. Брострена. - В 2-х томах. Том 2. - М.: Машиностроение, 1976. - С. 720.

160 Стеглянов Б.Л. Методика определения положения мгновенной оси вращения шарошки и оценка эффективности долота / Б.Л. Стеглянов, И.И. Шамансуров // сборник: Совершенствование техники и технологии разведочных горнобуровых работ. - Ташкент, 1972. - С 45-47.

161 Стеглянов Б.Л. Повышение эффективности породоразрушающих буровых инструментов на основе сравнительного анализа кинетических характеристик их вооружения: дис. ...докт. техн. наук: 05.15.10 / Стеглянов Борис Леонтьевич. - М., 1988. - 393 с.

162 Степанов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний / М.Н. Степанов. - М.: Машиностроение, 1972. - 232 с.

163 Султанов С.Г. Прогрессивная технология нефтепромыслового машиностроения / С.Г. Султанов. - М.: Машиностроение, 1969. - 231 с.

164 Тимошенко С.П. Механика материалов / С.П. Тимошенко, Д.Ж. Гере. - М.: Мир, - 1976. - С. 69-72.

165 Типовая методика испытаний шарошечных долот при бурении нефтяных и газовых скважин. РД 39-2-754-82. - М.: Изд-во Миннефтепром СССР. - 1982. - С. 126.

166 Харин О.Н. Лекции по теоретической механике. Часть 1: Учебное пособие / О.Н. Харин. - М.: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001.- С. 65-68.

167 Хлус А.А. Повышение эффективности бурового одношарошечного долота: дис. ...канд. техн. наук: 05.05.06 / Хлус Андрей Александрович. - Екатеринбург, 2010. - 119 с.

168 Эйгелес Р.М. Разрушение горных пород при бурении / Р.М. Эйгелес. - М.: Недра, 1971. - 231 с.

169 Эйгелес Р.М. Оптимизация процесса разрушения забоя породоразрушающими элементами / Р.М. Эйгелес, Р.В. Стрекалова, Н.Н. Мустафина // Нефтяное хозяйство. - 1972. - №9. - С. 34-38.

170 Ясашин В.А. Повышение эффективности породоразрушающего бурового инструмента конструкторско-технологическими методами: дис. ...докт. техн. наук: 05.02.13 / Ясашин Виталий Анатольевич. - М., 2009. - 463 с.

171 Ясашин В.А. Сравнительный анализ работы гидромониторных насадок круглого и гексагонального сечений / В.А. Ясашин, Д.Ю. Сериков, Д.В. Сморкалов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. - 2015. - №4. - С. 22-28.

172 Cholet H. Unique bit design improves hydraulics and performance / H. Cholet, G. Baron, R. Larayres, J. Brisac // World Oil. – 1971. - October.

173 Patent USA № 3115200 Drill bit nozzle assembly. Clayton C. Mandrell. 28.08.1957; OGUSPO № 4. 24.12.1996.

174 Patent USA № 4711311 Vibration and erosion resistant nozzle. Lance D. Underwood. 20.11.1986; OGUSPO № 2. 08.12.1987.

175 Yasashin V.A. Improving quality centrifugally-reinforced composite material / V.A. Yasashin, D.Yu. Serikov, R.A. Vorobeva // 3<sup>rd</sup> National Conference on POLIMER COMPOSITES AND COMPOSITIONS. Technical University of Szczecin Polimer Institute Szczecin-Miedzyzdroje. - Poland. - 1997.

## Приложение А Рецензия на книгу

### Рецензия

на монографию «Повышение эффективности шарошечного бурового инструмента с косо-  
зубым вооружением» кандидата технических наук, доцента РГУ нефти и газа имени И.М.  
Губкина, Серикова Дмитрия Юрьевича.



В монографии проанализированы существующие конструкции вооружения и системы промывки шарошечного бурового инструмента, а так же некоторые аспекты технологий их изготовления с учетом собственного опыта работы автора и анализа мировых достижений в этой области. Достаточно подробно изучены основные факторы, определяющие эффективность работы шарошечного бурового инструмента.

Большое внимание автором уделено математическому моделированию процесса перекатывания шарошки бурового инструмента при классическом и реактивно турбинном бурении скважин; силового взаимодействия зубьев вооружения шарошек с забоем; процесса центробежного объемного армирования косозубого асимметричного вооружения бурового инструмента.

Автором достаточно объемно и квалифицированно проведены исследования: отклоняющих и стабилизирующих сил, возникающих при работе инструмента с косозубым вооружением; истечения промывочной жидкости из фасонных гидромониторных насадок, влияния вращающихся зубьев вооружения шарошечного бурового инструмента на гидравлическую среду забоя.

К положительным сторонам работы можно отнести разработанные автором оригинальные методики: определения положения мгновенной оси вращения шарошки бурового инструмента; определения модуля упругости и допускаемого напряжения при изгибе композиционных материалов, используемых для упрочнения вооружения шарошечного бурового инструмента; расчета зубьев вооружения шарошечного бурового инструмента на прочность, основанного на методе конечных элементов.

Полученные результаты, определяют высокую теоретическую значимость данной работы, и, несомненно, позволят существенно повысить качество и снизить сроки проектирования новых конструкций шарошечного бурового инструмента.

Практическая значимость данной монографии заключается в том, что автором разработано несколько вариантов геометрии косозубого вооружения шарошек, позволяющих предотвращать образование забойной реки в течение всего цикла работы инструмента. Создана форма зубьев ведомых венцов вооружения шарошек, обеспечивающая значительное снижение необходимого усилия для успешного разрушения породы забоя.

Автором разработан целый ряд конструктивных схем шарошечных долот, предназначенных, как для обычных, так и специальных способов бурения пород различной твер-



дости. Более пятнадцати конструкторских решений автора, представленных в данной монографии, защищены патентами Российской Федерации.

С учетом значительных объемов бурения, осуществляемых в настоящее время шарошечным буровым инструментом, актуальность работы не вызывает сомнений.

Монография является содержательным, полезным, добротным выполненным научным трудом, направленным на повышение эффективности шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением и отражает квалифицированный взгляд автора на перспективы инновационного технического и технологического совершенствования шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением.

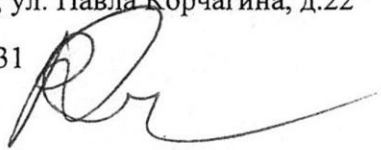
Со своей стороны хотелось бы отметить, чтобы автор уделил больше внимания вопросам работы разнонаправленного косозубого вооружения периферийных венцов шарошек при формировании и калибрования стенки скважины.

Однако это пожелание не умаляет достоинств рецензируемой рукописи. Данная работа будет полезна как специалистам, занимающимся разработкой и созданием шарошечного бурового инструмента, так и студентам и аспирантам учебных заведений.

Представленный в данной монографии материал, несомненно, представляет научный и технический интерес и рекомендуется к опубликованию.

Рецензент, доктор технических наук, профессор  
факультета «Горное и нефтегазовое производство»  
ФГБОУ ВПО Московского Государственного  
Университета Машиностроения (МАМИ),  
Заслуженный изобретатель Российской Федерации.  
107996, г. Москва, ул. Павла Корчагина, д.22

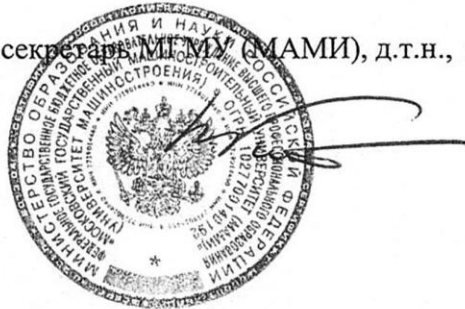
Тел. (495) 683-99-31  
В.М.Кононов



Подпись рецензента Кононова Виктора Михайловича  
заверяю.

Главный ученый секретарь МАМИ (МАМИ), д.т.н., проф.

И.И.Колтунов



## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Московский государственный  
машиностроительный  
университет (МАМИ)»  
(Университет машиностроения)

119991, г. Москва,  
Ленинский проспект, 65

РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина

Б. Семеновская ул., д. 38, Москва, 107023  
Тел. (495) 223-05-23 Факс (499) 785-62-24  
E-mail: [kanc@mami.ru](mailto:kanc@mami.ru), <http://www.mami.ru>  
ИНН 7719014460/КПП 771901001  
ОКПО 02068692, ОКЭВД 80.30.1  
ОКАТО 45263588000

Проректору, докт. техн. наук, профессору  
В.Н.Кошелеву

16. 06 2015 № 8-56-31/2422

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Уважаемый Владимир Николаевич!

Просим Вас рассмотреть вопрос о возможности передачи библиотеке нашего Университета на безвозмездной основе нескольких экземпляров книги доцента РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина Серикова Д. Ю. «Повышение эффективности шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением», М., Из-во «Нефть и Газ», 2015 г. с целью использования в учебном процессе по направлениям «Нефтегазовое дело» и «Горное дело».

Главный ученый секретарь МГУТУ (МАМИ)  
докт. техн. наук, профессор



И.И. Колтунов



*(Handwritten signatures)*

**Приложение Б**  
**Справки об изготовлении**



ОАО "ВОЛГАБУРМАШ"  
ИНН 6314007329  
ул. Грозненская, 1  
г. Самара, 443004, Россия

Тел.: +7 (846) 300-8000. Факс: +7 (846) 300-8000.  
E-mail: mail@vbm.ru www.vbm.ru

Исх. № 147 от 11 февраля 2015 г.

**СПРАВКА**

о себестоимости изготовления шарошечных буровых долот  
с косозубым вооружением на ОАО «Волгабурмаш».

Себестоимость изготовления опытных шарошечных долот 295,3 (11 5/8) STM 121 (295,3 М-ЦГВ) с разнонаправленным косозубым вооружением и их режущих комплектов, изготовленных в рамках проведения докторской диссертационной работы Серикова Дмитрия Юрьевича, к.т.н., доцента РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в соответствии с Патентом РФ на изобретение №2522608, аналогична себестоимости базовых, серийно выпускаемых долот 295,3 (11 5/8) STM 121 (295,3 М-ЦГВ) и их режущих комплектов с обычным прямозубым вооружением.

Главный инженер  
ОАО «Волгабурмаш»



А.М. Гринев

Подпись

Начальник  
отдела кадров



1 042734

Тел.: +7 (846) 300-8000. Факс: +7 (846) 300-8000.  
E-mail: mail@vbm.ru www.vbm.ru

## СПРАВКА

о проведении работ по созданию шарошечного бурового инструмента  
с косозубым вооружением на АО «Волгабурмаш».

На заводе в период с 2015 года по настоящее время проводится изготовление опытных образцов шарошек, секций и шарошечных буровых долот с поверхностно армированным разно-ориентированным косозубым вооружением по разработкам к.т.н., доцента РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Серикова Дмитрия Юрьевича. Заказчиком выступает ЗАО «Проммашсервис».

В результате проведенной работы были изготовлены:

- шарошки с новой геометрией вооружения и секции долот 295,3 (11 5/8) STM 121 (295,3 М-ЦГВ) с косозубым вооружением различной направленности, для оснащения опытных одноименных трехшарошечных долот и шестишарошечных наддолотных расширителей новых конструкций;
- два долота 295,3 (11 5/8) STM 121 (295,3 М-ЦГВ) (серийные номера №1048882 Паспорт №0386791 и №1048883 Паспорт №0386792), с разнонаправленным поверхностно-армированным косозубым вооружением новой конструкции;
- два долота 295,3 (11 5/8) STM 121 (295,3 М-ЦГВ) (серийные номера №1048880 Паспорт №0386789 и №1048881 Паспорт №0386790), с однонаправленным поверхностно-армированным зубчатым вооружением новой конструкции;
- два долота 295,3 (11 5/8) STM 121 (295,3 М-ЦГВ), с однонаправленным поверхностно-армированным косозубым вооружением новой конструкции.

Проектирование и изготовление всех опытных образцов как шарошечных буровых долот с косозубым вооружением различной ориентации, так и их отдельных элементов (шарошек и секций) новых конструкций проводится под авторским надзором специалистов РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина и ЗАО «Проммашсервис».

Главный инженер  
АО «Волгабурмаш»

КОПИЯ ВЕРНА

ДИРЕКТОР

А.В. Мурадоє



А.С. Добин

8900007

КОПИЯ  
ВЕРНА





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ  
ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«ПРОММАШСЕРВИС»

Адрес почтовый: 117218, Москва-218 В, а/я 19

Тел./факс: (495) 124-05-33, 124-34-33

Адрес юридический:

117218, г. Москва, ул. Кржижановского, д.14, корп.2

Сайт: [HTTP://CORP.PROMMASH.RU/](http://corp.prommash.ru/), E-MAIL: PROMMASHSERVIS@LIST.RU

ИНН 7727143501, КПП 772701001

Р/с 40702810100760002491

ОАО «МОСКОВСКИЙ КРЕДИТНЫЙ БАНК», г. Москва

К/с 30101810745250000659, БИК 044525659

Коды: ОКПО 47365909, ОКОНХ 14184

Исх. №1919/12 от 14 декабря 2016 г.

**СПРАВКА**

**о проведении работ по созданию новых конструкций  
шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением  
и экспериментальными гидромониторными насадками на ЗАО «Проммашсервис»**

На производственных площадях ЗАО «Проммашсервис» в период с 2015 года по настоящее время проводится изготовление гидромониторных насадок с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением для различного шарошечного бурового инструмента, а так же новых конструкций шестишарошечных расширителей с косозубым вооружением по разработкам к.т.н., доцента РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, Серикова Дмитрия Юрьевича.

В результате проведенной работы были изготовлены:

- боковые гидромониторные насадки конфузорного типа (25 штук) с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением для оснащения долот 295,3 (11 5/8) 8ТМ 121 (295,3 М-ЦГВ) и 295,3 М-ГВ, как с прямозубым, так и косозубым вооружением различной направленности.
- центральные гидромониторные насадки диффузорного типа (20 штук) с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением для оснащения долот 295,3 (11 5/8) 8ТМ 121 (295,3 М-ЦГВ), как с прямозубым, так и косозубым вооружением различной направленности.
- боковые гидромониторные насадки конфузорного типа (18 штук) с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением для оснащения пилотных долот, используемых при бурении в компоновке с наддолотными шестишарошечными расширителями 6РШ-555М с косозубым вооружением.
- экспериментальные наддолотные шестишарошечные расширители 6РШ-555 М с косозубым вооружением в количестве 4 (четыре) штук.

Проектирование и изготовление всех опытных образцов гидромониторных насадок различных размеров и конструкций, а так же опытных образцов наддолотных шестишарошечных расширителей с косозубым вооружением проводятся под авторским надзором специалистов РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина

Генеральный директор  
ЗАО «Проммашсервис»



В.А. Боднарчук

**Приложение В**  
**Акты промышленных испытаний**

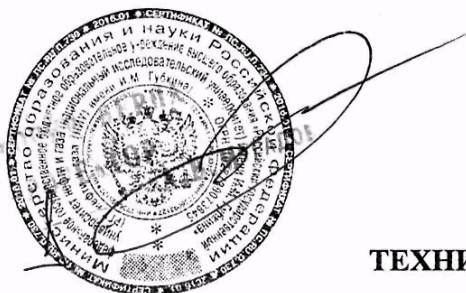
**УТВЕРЖДАЮ:**

Технический директор

ООО «ХимБурСервис»

к.т.н. А.Н.Сурков

2016.



**ТЕХНИЧЕСКАЯ СПРАВКА**

о проведения эксплуатационных испытаний  
долот Ш295,3 МЦ-ГВ с косозубым вооружением

Испытания проведены при бурении эксплуатационных скважин в соответствии с типовой методикой государственных испытаний шарошечных долот РД 39-07/01-0002-89.

**1 Предмет испытаний**

Экспериментальные шарошечные долота Ш 295,3 МЦ-ГВ с косозубым вооружением предназначены для вращательного бурения скважин сплошным забоем в мягких породах с промывкой забоя водой или глинистым раствором при роторной в сочетании с объемным двигателем ДР-240 компоновке.

Характеристика объекта испытаний:

- долото Ш 295,3 МЦ-ГВ состоит из трех сваренных между собой секций:
- тип опоры - негерметизированная - ролик - шарик - ролик.
- промывка – комбинированная гидромониторная (центральная + симметричная боковая).
- шарошки с разнонаправленным косозубым фрезерованным вооружением, поверхностно-армированным твердым сплавом.
- завод изготовитель - ОАО «Волгабурмаш».

**2 Цель испытаний**

Определение эффективности работы и целесообразности серийного производства, рекомендации по дальнейшему совершенствованию конструкции и технологии изготовления долот Ш 295,3 МЦ-ГВ с косозубым вооружением.

**3 Качество изготовления долот**

Долота Ш 295,3 МЦ-ГВ с косозубым вооружением изготовлены в соответствии ГОСТ 20692-2003 «Долота шарошечные» и приняты ОТК завода изготовителя ОАО «Волгабурмаш».

Каждое долото имеет паспорт установленного образца.

При проведении входного контроля ОТК ОАО «Волгабурмаш» отступлений от основных технических требований и чертежей не обнаружено, все долота допущены к испытаниям.

**4 Место и условия испытаний**

Испытания экспериментальных Ш 295,3 МЦ-ГВ и серийных (базовых) долот проведены при бурении ООО «ХимБурСервис» скважин на месторождениях Самарской области.



- месторождение (площади) - Мухановская, Кулешовская.
- буровые скважины № 116, 3036, 1369,462.

Буровое оборудование:

Буровая установка - БУ-2500/160 ДГУ, тип привода – дизельный.

Буровые насосы – УНБТ-600, УНБТ-950.

Система очистки промывочной жидкости – ВС-1, УОБР-1, илопескоотделитель.

Способ бурения – ДР 240 - ротор (30-60) об/мин.

Компоновка бурового инструмента:

- долото + ДР 240 + УБТ-203 + СБТ-127х9,2Е

Интервал бурения -315-1200 м.

Стратиграфическое подразделение – Калиновская свита, Кунгурский ярус.

Литология (разбуриваемые породы) – алевролиты, доломиты, известняки.

#### Параметры режима бурения и бурового раствора

Параметры	ДР 240 + ротор
- интервал бурения, м.	315-1300
- осевая нагрузка на долото, кН (т.с.)	9-14
- частота вращения долота, об/мин	160+60
- расход бурового раствора, л/сек	52-54
- условная вязкость, сек	35-45
- плотность промывочной жидкости- г/см <sup>3</sup>	1,12 - 1,14

### 5 Результаты испытаний

Результаты испытаний экспериментальных Ш 295,3 МЦ-ГВ и серийных (базовых) долот представлены в таблице 1.

Табл. 1

Долото	Кол-во долот, шт.	Интервал бурения, м.		Проходка, м	Время мех бур. час	Средние показатели на долото					
						Проходка		Время мех бурения, час		Мех. скорость,	
		от	до			м	%	час	%	м/час	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
косозубое	2	315	1300	985	68,9	985	102	68,9	85,7	14,3	119
прямозубое	2	315	1277	962	80,4	962	100	80,4	100	12,0	100

Как видно из таб.1 при бурении в компоновке с объемным двигателем ДР 240 - 160об/мин + ротор - 30-60 об/мин. экспериментальные долота Ш 295,3 МЦ-ГВ с косозубым вооружением по сравнению с базовой конструкцией долот Ш 295,3 МЦ-ГВ с прямозубым вооружением показали увеличение механической скорости бурения в интервале 315-1300 м. на 19%, при одновременном увеличении проходки на долото на 2%.

### 6. Характер и уровень износа долот, их узлов, деталей и элементов

После окончания испытаний был проведен анализ характера износа экспериментальных долот Ш 295,3 МЦ-ГВ с косозубым вооружением и базовых долот Ш 295,3 МЦ-ГВ с прямозубым вооружением.

Анализ износа показал:

- сбалансированность изнашивания вооружения и опоры всех отработанных экспериментальных долот;
- вооружение изношено минимально и имеет незначительную потерю геометрии вооружения в основном за счет периферийных венцов шарошек;
- на долотах с прямозубым вооружением в некоторых местах наблюдается незначительные сколы, как твердосплавного покрытия, так и самой стальной основы зубьев;
- износ подшипниковых узлов серийных и экспериментальных долот - незначительный;
- люфт в подшипниковых узлах отработанных долот с прямозубым и косозубым вооружением примерно одинаков;
- потеря диаметра всех долот незначительная.

### 7. Выводы и рекомендации

В результате испытаний комиссия установила, что конструкция долота Ш295,3МЦ-ГВ с косозубым вооружением работоспособна.

В процессе работы аварий с долотами не было.

Опытные долота Ш295,3МЦ-ГВ с разнонаправленным косозубым вооружением по механической скорости бурения превосходят своих аналогов с прямозубым вооружением на 19%.

Износ подшипниковых узлов долот с косозубым вооружением практически аналогичен износу серийных долот с прямозубым вооружением.

Комиссия по испытаниям рекомендует, для окончательных выводов об эффективности долот Ш295,3МЦ-ГВ с косозубым вооружением, изготовить на ОАО «Волгабурмаш» опытно-промышленную партию и провести эксплуатационные испытания долот данной конструкции не менее чем в трех районах.

Ведущий инженер ООО «ХимБурСервис»

Е.Ю. Чумак

Ведущий инженер ООО «Траектория Сервис»

М.М. Каськов

Директор по производству ЗАО «Проммашсервис»

Н.Д. Граб

Доцент РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина

Д.Ю. Сериков





УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор

ООО «Северо-Запад»

И.Б. Храмов



9 февраля 2017

о проведения эксплуатационных испытаний  
опытных образцов шарошечных расширителей 6РШ-555М  
с разнонаправленным косозубым вооружением

### 1 Комиссия в составе:

- Председателя - главный инженер ООО «Северо-Запад», Васильев А.Г.  
Членов комиссии: - инженер по буровым работам ООО «Северо-Запад», Бурцев Д.Е.  
- директор по производству ЗАО «Проммашсервис», Граб Н.Д.  
- начальник механо-сборочного цеха ЗАО «Проммашсервис», Пронин В.В.  
- доцент РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, к.т.н., Сериков Д.Ю.

в период с «26» октября 2016 года по «22» февраля 2017 года провела эксплуатационные испытания 2 (двух) штук опытных шарошечных расширителей 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением в соответствии с типовой методикой государственных испытаний шарошечных долот РД 39-07/01-0002-89.

### 2 Предмет испытания

Экспериментальный шарошечный расширитель 6РШ-555М, оснащенный шестью секциями долота Ш295,3М-ГВ с разнонаправленным косозубым вооружением, совместного изготовления ЗАО «Проммашсервис» и ОАО «Волгабурмаш».

Назначение - предназначен для последовательного увеличения диаметра ствола скважины до номинального в процессе бурения пилот ствола и одновременного расширения с бурением скважины в мягких с пропластками средней твердости породах.

Промывка только через пилотное долото Ш295,3М-ГВ – гидромониторная, с использованием экспериментальных гидромониторных насадок конфузорного типа с внутренним шестигранным асимметричным поперечным сечением. Шарошки экспериментального пилотного долота и расширителя с разнонаправленным косозубым поверхностно-армированным твердым сплавом стальным вооружением.

### 3 Цель испытаний

Определение эффективности работы и целесообразности серийного производства, рекомендации по дальнейшему совершенствованию конструкции и технологии изготовления шарошечных расширителей 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением.

#### 4 Качество изготовления шарошечных расширителей

Шарошечные расширители 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением, согласно паспортов, приняты ОТК ЗАО «Проммашсервис», отступлений от основных технических требований и чертежей не обнаружено. После внешнего осмотра членами комиссии все шарошечные расширители 6РШ-555М были допущены к испытаниям.

#### 5 Место и условия испытаний

Испытания экспериментальных шарошечных расширителей 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением и серийных (базовых) с прямозубым вооружением проведены на буровых площадях ООО «Северо-Запад». Буровые скважины №93-1 и №95-1.

Буровое оборудование:

- мобильная буровая установка – МБУ-125, тип привода – дизельный;
- насосно-силовой блок с насосом – УНБ-600.
- система очистки промывочной жидкости – трехступенчатая очистка.
- способ бурения – роторный.
- компоновка бурового инструмента: – пилотное долото Ш295,3М-ГВ + шарошечный расширитель 6РШ-555М + УБТ-203 + УБТ-178 + СБТ-127х9,2Е.
- интервал бурения - 0-240 метров;

Параметры режима бурения и бурового раствора:

- осевая нагрузка на долото, кН (т.с.) – 80-100 (8-10);
- частота вращения долота, об/мин - 90-120;
- расход бурового раствора, л/сек - 35-40;
- условная вязкость, сек - 35-45;
- плотность промывочной жидкости- г/см<sup>3</sup> - 1,12.

#### 6 Результаты испытаний

Результаты испытаний экспериментальных шарошечных расширителей 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением и серийных (базовых) шарошечных расширителей представлены в таблицах 1,2 и 3.

Как видно из таблиц, пилотное опытное долото Ш295,3М-ГВ и экспериментальный шарошечный расширитель 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением по сравнению с базовыми конструкциями долота Ш 295,3М-ГВ и шарошечного расширителя с прямозубым во-



оружием при роторном способе бурения 2 скважин, показали увеличение механической скорости бурения в интервале 0-240 метров на 19-23%.

Результаты работы шарошечных расширителей 6РШ-555М, на скважине №93-1 Таблица 1

пилот долото + расширитель	Кол- во, шт.	Интервал бурения, м.		Про- ходка, м	Время мех бур. час	Средние показатели на навеску					
						Проходка		Время мех бурения, час		Мех. ско- рость,	
		от	до			м	%	час	%	м/час	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>косозубые</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>120</i>	<i>120</i>	<i>15,8</i>	<i>120</i>	<i>100</i>	<i>15,8</i>	<i>81</i>	<i>7,6</i>	<i>123</i>
прямозубые	1	120	240	120	19,4	120	100	19,4	100	6,2	100

Результаты работы шарошечных расширителей 6РШ-555М, на скважине №95-1 Таблица 2

пилот долото + расширитель	Кол- во, шт.	Интервал бурения, м.		Про- ходка, м	Время мех бур. час	Средние показатели на навеску					
						Проходка		Время мех бурения, час		Мех. ско- рость,	
		от	до			м	%	час	%	м/час	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
прямозубые	1	0	120	120	19,0	120	100	19,0	100	6,3	100
<i>косозубые</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>230</i>	<i>110</i>	<i>14,7</i>	<i>110</i>	<i>92</i>	<i>14,7</i>	<i>77</i>	<i>7,5</i>	<i>119</i>

Сводная таблица работы шарошечных расширителей 6РШ-555М Таблица 3

пилот долото + расширитель	Кол- во, шт.	Интервал бурения, м.		Про- ходка, м	Время мех бур. час	Средние показатели на навеску					
						Проходка		Время мех бурения, час		Мех. ско- рость,	
		от	до			м	%	час	%	м/час	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>косозубые</i>	<i>2</i>	<i>0</i>	<i>230</i>	<i>230</i>	<i>30,5</i>	<i>230</i>	<i>96</i>	<i>30,5</i>	<i>79</i>	<i>7,54</i>	<i>121</i>
прямозубые	2	0	240	240	38,4	240	100	38,4	100	6,25	100

#### 7. Характер и уровень износа шарошечных расширителей 6РШ-555М, их узлов, деталей и элементов

После окончания испытаний был проведен анализ характера износа экспериментальных шарошечных расширителей 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением и базовых шарошечных расширителей с прямозубым вооружением.

Анализ характера износа показал:

- В результате осмотра отработанных шарошечных расширителей было установлено, что:
- износ всех отработанных шарошечных расширителей по вооружению и опоре незначительный;
  - вооружение изношено минимально и имеет небольшую потерю геометрии вооружения, как основных, так и периферийных венцов шарошек;
  - на шарошечных расширителях с прямозубым вооружением в некоторых местах наблюдается незначительные сколы, как твердосплавного покрытия, так и самой стальной основы зубьев;

- размыва гидромониторных узлов и выпадения насадок конфузорного типа с внутренним шести-гранным асимметричным поперечным сечением экспериментальных пилотных долот Ш295,3М-ГВ с разнонаправленным косозубым вооружением - не зафиксировано;
- износ подшипниковых узлов шарошечных расширителей 6РШ-555М с разнонаправленным ко-созубым вооружением сопоставим с аналогичными показателями расширителей с прямозубым вооружением.
- потеря диаметра всех шарошечных расширителях незначительная.

#### 8. Выводы и рекомендации


В результате испытаний комиссия установила, что все шарошечные расширители 6РШ-555М соответствовали требованиям нормативно технической документации и работоспособны. В процессе работы осложнений и аварий с шарошечными расширителями 6РШ-555М не наблюдалось.

Бурение экспериментальными шарошечными долотами Ш295,3М-ГВ с косозубым вооружением, оснащенными гидромониторными насадками конфузорного типа с внутренним шести-гранным асимметричным поперечным сечением, совместно с экспериментальными расширителями 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением, показало, что они по механической скорости превосходят своих базовых аналогов с прямозубым вооружением на 19-23%.

Износ подшипниковых узлов шарошечных расширителей 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением сопоставим с аналогичными показателями расширителей с прямозубым вооружением.

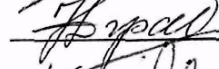
Для окончательных выводов об эффективности шарошечных расширителей 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением, комиссия рекомендует изготовить на ЗАО «Проммашсервис» более значительную партию и провести обширное испытание шарошечных расширителей данной конструкции.

Председатель комиссии:

 А.Г. Васильев

Члены комиссии:

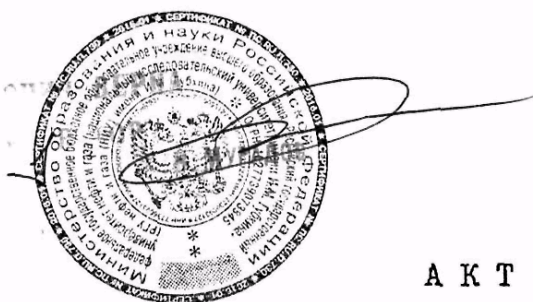
 Д.Е. Бурцев

 Н.Д. Граб

 В.В. Пронин

 Д.Ю. Сериков





УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер объединения  
"Брянское шахтобурение"

А.К.Агарков



## А К Т

о проведении промышленных испытаний долот Ш490С-ЦВР-1  
изготовленных Сарапульским машзаводом им. Дзержинского

Комиссия в составе: председателя т.Гордона З.Л. - зам.генерального  
директора по произв.

Члены комиссии ;

начальник ПРО С.А.Мищенко  
начальник техотдела В.Е.Леоненко  
представители МИНГ им.Губкина  
Д.Ю.Сериков  
В.А.Ясашин

в январе 1991 г провела контрольные испытания опытно-шарошечных долот Ш490С-ЦВР-1 в количестве 7 шт. Испытания проводились в соответствии с действующей "Типовой методикой проведения промышленных испытаний опытно- и опытно-промышленных партий шарошечных долот новых конструкций", разработанной в НИИБЭТ и составлены на основе "Программой проведения промышленных испытаний" опытных долот Ш490С-ЦВР-1 на вентскважине "Брянковская".

## Предмет испытания

Долото Ш490С-ЦВР-1, отличающиеся новой конструкцией вооружения изготовлены на Сарапульском машзаводе им.Дзержинского.

Долото Ш490С-ЦВР-1 предназначено для бурения мягких и средних пород. Опора долота стандартная.

Шарошка долота Ш490С-ЦВР-1 в отличии от своего серийного прототипа представляет собой сборную конструкцию, состоящую из центрабежно-объемных армированного венца и ступицы.

Центрабежно-объемно-армированные венцы являющиеся вооружением бурового долота изготавливались на заводе эксп.машин ВНИНефтемаша по технологии разработанной в МИНГ им.Губкина. Матрица композиционного материала венцов - сталь 18ХН2МФЛ, армирующий компонент зерна релита.

"Технология центробежного объемного армирования позволила создать вооружение бурового долота Ш490С-ЦВР-I армированного твердым сплавом не только по поверхности зубьев, но и по всему их объему.

Ступицы для экспериментальных долот были изготовлены из стали 18ХНЗА на Сарапульском машзаводе им. Дзержинского. В качестве способа крепления центробежно-объемно-армированного венца на поверхности ступицы использовалась электро-дуговая сварка. Система промывки забоя - центральная. Перед началом испытаний было установлено, что представленные на испытания долота соответствуют условиям ТУЗ9-57-87 ОСТ 26-02-315-84 и признаны годными к эксплуатации.

### 3. Цель испытаний

Испытать 7 опытных долот типа Ш490С-ЦВР-I на породах VIII категории твердости. Проверить эффективность долот новой конструкции изготовленных на Сарапульском машзаводе им. Дзержинского в условиях бурения скважины агрегатом РТБ на участке шах. "Брянковская".

### 4. Место и условия испытаний. База сравнения.

Вент. скважина на участке шахты "Брянковская". Испытываемые долота Ш490С-ЦВР-I сопоставлялись с долотами Ш490С-ЦВР.

Долота обрабатывались на агрегате РТБ-3, 2. Частота вращения ротора 4 обор./мин, турбобура - 550 об./мин. Буровая оснащена насосами У8-6МА /4 насоса/. Осевая нагрузка на долото при бурении составила 5 тонн. Расход промывочной жидкости 100 л/с /техническая вода/.

В соответствии с "Программой ..." долота испытывались на глубине 74, 70-79, 95 м. при бурении пород VIII кат.

### 5. Результаты работы долот.

Показатели работы испытываемых долот Ш490С-ЦВР-I в сравнении с долотами Ш490С-ЦВР.

Данные показывают, что основные показатели такие как : проходка, механическая скорость бурения и стойкость вооружения опытных долот Ш490С-ЦВР-I превышают аналогичные показатели долот Ш490С-ЦВР при бурении пород VIII кат. твердости.

Осмотр вооружения и опор после отработки позволил сделать следующие выводы :

I. На некоторых шарошках имеются незначительные сколы режущей структуры.

2. Износ вооружения составил в среднем 90% /вылет отработанных зубьев над телом шарошки относительно первоначального вылета/ .



Шифр навеска	Глубина	Категория	Кол-во испытаний	Проход ка м	Стойкость (время буриения)			Износ % (по молотам)			Заклинива ние опор ного узла	Механиче ская ско рость бу риения см.
					1	2	3	4	1	2		
1. Ш 490ТЗ-ЦВР	74,70	УШ	4	0,9	II	100	100	100	100	3-I	8,2	
2. ДРБ-750	75,60											
3. Ш490ТЗ-ЦВР												
4. Ш490ТЗ ЦВР												
1. Ш490С-ЦВР-I	75,60	УШ	I	0,75	6,5	50	100	70			8,82	
2. ДРБ-750												
3. Ш490С	76,35											
4. Ш490С-ЦВР												
1. Ш490ТЗ-ЦВР	76,35	УШ		0,75	8	100	100	100		2-I	9,37	
2. ДРБ-750												
3. Ш490ТЗ-ЦВР	77,1									4-I		
4. Ш490ТЗ-ЦВР												
1. Ш490С-ЦВР-I	77,1	УШ	3	1,2	12	100	70	100		3-I	10,0	
2. ДРБ-750												
3. Ш490С-ЦВР-I	78,3											
4. Ш490С-ЦВР-I												
1. Ш490С-ЦВР	78,3	УШ		0,7	9	80	70	70		3-I	7,8	
2. ДРБ-750												
3. Ш490СШЦВР	79,00											
4. Ш490С-ЦВР												
1. Ш490С-ЦВР-I	79,00	УШ	3	0,95	10						9,5	
2. ДРБ-750												
3. Ш490С-ЦВР-I	79,95											
4. Ш490С-ЦВР-I												

Начальник участка шахты "Брянковская"

Машинист

Щупеня Н.И.

Парфёненко Л.Ф.

3. Наиболее характерны причины выхода из строя опорного узла является его заклинивание, которое происходит, как правило, при износе вооружения на 70-90%

4. Сварное соединение центрабежно-объемно-армированного венца и ступицы сборной шарошки является надежным.

5. Износ режущей структуры опытных долот Ш490С-ЦВР-I почти не изменяет геометрию колирующих конусов шарошек, что позволяет получать требуемый диаметральный размер ствола.

6. Износ вооружения серийных долот Ш490С-ЦВР сопровождается значительным изменением геометрии колирующих поверхностей. Это связано прежде всего со скалыванием твердосплавной поверхностной наплавки и зализыванию режущей структуры.

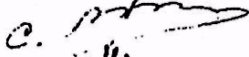
Для окончательных выводов об эффективности долот с новой конструкцией вооружения (оснащенными центрабежно-объемно-армированными венцами) комиссия предлагает изготовить на Сарапульском машзаводе им. Дзержинского более значительную партию долот и провести обширное испытание опытных долот на породах различной твердости. Однако стоимость опытных долот Ш490С-ЦВР-I не должна превышать стоимость долот типа Ш490С-ЦВР.

Зам. генерального директора



З.Л. Гордон

Начальник ПРО



С.А. Мищенко

Начальник техотдела



В.Е. Леоненко

Представители МИНГ  
им. И.М. Губкина



Д.Ю. Сериков

В.А. Ясашин







## АКТ

о проведении промышленных испытаний долот

Ш490ТЗ-ЦВР-9

### 1. Комиссия в составе:

- |  |   |                  |
|--|---|------------------|
| Председатель                                 | • зам. главного инженера Свердловского ЦШТУ | • Курочкин И.Н.  |
| Члены комиссии:                              | • начальник участка ЦШТУ                    | • Лаврисюк А.    |
|  | • механик участка ЦШТУ                      | • Украинцев А.Г. |
|  | представители заказчика:                    |                  |
|  | • с.н.с., к.т.н., ГАНГ им. Губкина          | • Ясашии В.А.,   |
|  | • с.н.с., к.т.н., НПФ "Маяна"               | • Сериков Д.Ю.   |
| • представитель А.О. "Сарапульский МАШЗАВОД" | • Зеленин Б.Ф.                              |                  |

В декабре 1994 года провела контрольные испытания опытной партии шарошечных долот Ш490ТЗ-ЦВР-9 в количестве 12 шт. Испытания проводились в соответствии с действующей "Типовой методикой испытаний опытных и опытно-промышленных партий шарошечных долот ..." /РА-2-754-82/, разработанной ВНИИБТ и составленной на ее основе "Программой проведения промышленных испытаний" опытных долот Ш490ТЗ-ЦВР-9 на вентиляционной скважине шахты "Южная".

## 2. Объект испытания.

Опытное шарошечное долото Ш490ТЗ-ЦВР-9 содержащее корпус, с закрепленными на наклонных цапфах шарошками, с основным, промежуточным и периферийным венцами, армированными твердосплавными зубчатыми элементами, отличающееся тем, что угол конусности  $2\beta_0$  - основного венца каждой шарошки связан с углом наклона оси цапфы к оси долота  $\varphi_0$  зависимостью:

$$\beta_0 = 90^\circ - \varphi_0;$$

Помимо этого углы конусности промежуточного  $2\beta_1$ , и периферийного  $2\beta_2$  венцов, выполнены уменьшающимися в сторону от основного венца к периферийному ( $\beta_0 > \beta_1 > \beta_2$ ) и определяются по формулам:

$$\beta_1 = \beta_0 - \varphi_1 = \beta_0 - \arctg \frac{(0,7 \div 1,1)}{l_1} * h_1;$$

$$\beta_2 = \beta_0 - \varphi_2 = \beta_0 - \arctg \frac{(2,4 \div 2,8)}{l_2} * h_2;$$

где:

- $h_1$  и  $h_2$  - вылеты зубков на промежуточном и периферийном венцах;
- $l_1$  - расстояние между осями зубков, расположенных на промежуточном венце и смежным с ним венце основного конуса;
- $l_2$  - расстояние между осями зубков, расположенных на промежуточном и периферийном венцах;

Таким образом, вооружение шарошек опытного долота Ш490ТЗ-ЦВР-9, в отличие от серийного Ш490ТЗ-ЦВР, имеющее один периферийный венец, условно разделено на три функциональные зоны:

1. Основная зона - состоящая из трех венцов /геометрия вооружения которой образует плоский забой/, служит для разрушения и измельчения горной породы на забое, что позволяет:
  - повысить измельчение шлама на забое;
  - обеспечить равномерный износ рабочих поверхностей зубчатых твердосплавных элементов;
2. Вспомогательная зона - состоящая из одного промежуточного венца с углом конусности  $2\beta_1$ , служит для предварительного разрушения /посредством

сколов/ породы на забое при проскальзывании вооружения, связанного с вращением агрегата РТБ, что позволяет :

- повысить механическую скорость бурения агрегатами РТБ.
3. Центрирующая зона - состоящая из одного периферийного венца с углом конусности  $\approx 2$ , служит для центрирования агрегата и разрушения породы.

Опытное шарошечное долото Ш490ТЗ-ЦВР-9 зубчатым твердосплавным вооружением, предназначено для бурения горных пород с коэффициентом крепости 7-9 единиц по шкале проф. Протоdjяконова.

Опора шарошки выполнена по схеме: ролик-замковый шарик-ролик

Опытная партия долот Ш490ТЗ-ЦВР-9 изготовлена в соответствии с действующими техническими условиями на А.О. "Сарапульский МАШЗАВОД".

ОТК А.О. "Сарапульский МАШЗАВОД" опытные долота осмотрел, качество долот удовлетворительное.

Опытная партия долот Ш490ТЗ-ЦВР-9 изготовлена в соответствии с действующими техническими условиями на А.О. "Сарапульский МАШЗАВОД".

ОТК А.О. "Сарапульский МАШЗАВОД" опытные долота осмотрел, качество долот удовлетворительное.

### 3. Цель испытания.

Определение работоспособности 12 опытных долот Ш490ТЗ-ЦВР-9, в сравнении с серийными Ш490ТЗ-ЦВР, в промышленных условиях реактивно-турбинного бурения /РТБ/.

### 4. Место и условия проведения испытаний.

Промышленные испытания опытной партии долот Ш490ТЗ-ЦВР-9 были проведены на шахте "Южная" П.О. "РостовУголь" при реактивно-турбинном бурении ствола диаметром 4,0 метра в породах с коэффициентом крепости 7-9 единиц по шкале проф. Протоdjяконова, в интервале глубин : 334,49-337,3 метра.

Бурение осуществлялось при следующих технологических параметрах

- нагрузка на агрегат, т - 30
- частота вращения агрегата, об/мин - 1

- частота вращения турбобуров, об/мин - 600

Бурение ствола осуществлялось поочередно опытными долотами Ш490ТЗ-ЦВР-9 и серийными Ш490ТЗ-ЦВР. Перед спуском долот в скважину проводился их тщательный осмотр.

В процессе бурения через каждые 30 минут проверялись и фиксировались технологические параметры бурения.

Подъем инструмента производился при снижении механической скорости бурения более чем в 2 раза. После подъема инструмента /навески долот/ буровая бригада очищала его от шлама, промывала, а представители заказчика, измеряли: диаметр долот, офт шарошек и высоту зубчатого вооружения на всех венцах.

### 5. Результаты испытаний.

В результате промышленных испытаний 12 опытных долот Ш490ТЗ-ЦВР-9 комиссия установила следующее:

- Основные показатели такие как: проходка, механическая скорость бурения и стойкость вооружения опытных долот Ш490ТЗ-ЦВР-9 значительно превосходят аналогичные показатели серийных долот Ш490ТЗ-ЦВР, а именно: по проходке в 2,5 раза, по механической скорости бурения в 2 раза.
- Ресурс работы вооружения и опорных узлов опытных долот Ш490ТЗ-ЦВР-9 при бурении пород с коэффициентом крепости 7-9 единиц примерно одинаков.

Результаты испытаний приведены в Таблице N1.

### 6. Выводы и предложения.

1. Основные показатели такие как: проходка, механическая скорость бурения и стойкость вооружения опытных долот Ш490ТЗ-ЦВР-9 значительно превосходят аналогичные показатели серийных долот Ш490ТЗ-ЦВР, а именно: по проходке в 2,5 раза, по механической скорости бурения в 2 раза.
2. Ресурс работы вооружения и опорных узлов опытных долот Ш490ТЗ-ЦВР-9 при бурении пород с коэффициентом крепости 7-9 единиц примерно одинаков.

**Результаты промышленных испытаний  
опытной партии долот Ш490ТЗ-ЦВР-9**

Таблица 1.

<i>N</i>	Состав навески	Глубина, м	Катег. креп.	Проходка, м	Время бурения, час.	Мех. скор. бурения, м/ч.
1	2	3	4	5	6	7
1	Ш490ТЗ-ЦВР	334,49	7	0,31	6,04	0,0513
	Ш490ТЗ-ЦВР	-	-			
	Ш490ТЗ-ЦВР	334,8	9			
	Ш490ТЗ-ЦВР					
2	Ш490ТЗ-ЦВР-9	334,8	7	0,73	6,75	0,1082
	Ш490ТЗ-ЦВР-9	-	-			
	Ш490ТЗ-ЦВР-9	335,51	9			
	Ш490ТЗ-ЦВР-9					
3	Ш490ТЗ-ЦВР-9	335,51	7	0,77	7,17	0,1074
	Ш490ТЗ-ЦВР-9	-	-			
	Ш490ТЗ-ЦВР-9	336,26	9			
	Ш490ТЗ-ЦВР-9					
4	Ш490ТЗ-ЦВР	336,26	7	0,3	5,56	0,054
	Ш490ТЗ-ЦВР	-	-			
	Ш490ТЗ-ЦВР	336,56	9			
	Ш490ТЗ-ЦВР					
5	Ш490ТЗ-ЦВР-9	336,56	7	0,75	7,083	0,1059
	Ш490ТЗ-ЦВР-9	-	-			
	Ш490ТЗ-ЦВР-9	337,3	9			
	Ш490ТЗ-ЦВР-9					

Начальник участка шахты "Южная"


Машинист буровой

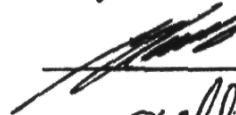
3. Для окончательных выводов об эффективности долот новой конструкции типа Ш490ТЗ-ЦВР-9, комиссия предлагает изготовить на А.О. "Сарапульский МАШИЗАВОД" более значительную партию опытных долот и провести обширные испытания.

Подпись :

  
\_\_\_\_\_ Курочкин И.Н.

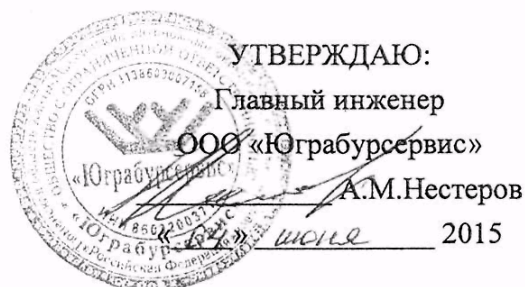
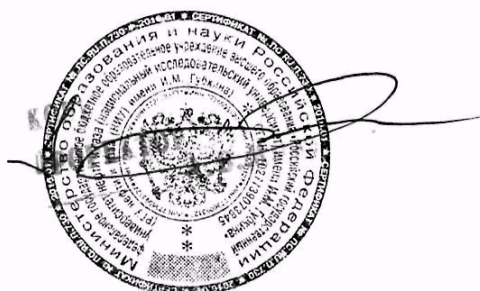
  
\_\_\_\_\_ Лазрисюк А.

  
\_\_\_\_\_ Украинец А.Г.

  
\_\_\_\_\_ Ясашин В.А.,

  
\_\_\_\_\_ Сериков Д.Ю.

  
\_\_\_\_\_ Зеленин Б.Ф.



УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер

ООО «Юграбурсервис»

А.М.Нестеров

июня 2015

## АКТ

о проведения эксплуатационных испытаний долот Ш490С-ЦВ и Ш393,7С-ЦВ, оснащенных центральными гидромониторными насадками диффузорного типа с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением.

**1 Комиссия в составе:**

- Председателя - заместитель генерального директора по производству  
ООО «Юграбурсервис» - Чумаков И.Е.
- Членов комиссии:
- заместитель генерального директора по геологии и бурению  
ООО «Юграбурсервис» - Зданович А.С.
  - главный технолог ООО «Юграбурсервис» - Ратников А.А.
  - мастер бригады бурения ООО «Юграбурсервис» - Макавчук А.М.
  - директор по производству ЗАО «Проммашсервис» - Граб Н.Д.
  - доцент РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, к.т.н. - Сериков Д.Ю.

в период с «20» сентября 2014 года по «04» июня 2015 года провела эксплуатационные испытания 2 штук шарошечных долот Ш490С-ЦВ и Ш393,7С-ЦВ, оснащенных экспериментальными центральными гидромониторными насадками диффузорного типа с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением в соответствии с типовой методикой государственных испытаний шарошечных долот РД 39-07/01-0002-89.

**2 Предмет испытания**

Экспериментальные шарошечные долота Ш490С-ЦВ и Ш393,7С-ЦВ предназначены для вращательного бурения скважин сплошным забоем в породах средней твердости, с промывкой забоя водой или глинистым раствором роторным или турбинным способом бурения:

- долота Ш490С-ЦВ и Ш393,7С-ЦВ состоят из трех сваренных между собой секций:
- тип опоры - негерметизированная - ролик - шарик - ролик.
- промывка – центральная гидромониторная.
- центральные гидромониторные насадки диффузорного типа с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением согласно патенту РФ на изобр. №2558030.
- завод изготовитель - ОАО «Волгабурмаш».



### *3 Цель испытаний*

Определение эффективности работы и целесообразности оснащения шарошечного бурового инструмента центральными гидромониторными насадками диффузорного типа с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением.

### *4 Качество изготовления долот*

Долота Ш490С-ЦВ и Ш393,7С-ЦВ изготовлены в соответствии ГОСТ 20692-2003 «Долота шарошечные» и приняты ОТК завода изготовителя ОАО «Волгабурмаш».

Каждое долото имеет паспорт установленного образца.

При проведении выходного контроля ОТК ОАО «Волгабурмаш» отступлений от основных технических требований и чертежей не обнаружено, все долота допущены к испытаниям.

Замена штатных гидромониторных насадок на экспериментальные диффузорного типа с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением осуществлена специалистами ЗАО «Проммашсервис».

### *5 Место и условия испытаний*

Испытания экспериментальных Ш490С-ЦВ и Ш393,7С-ЦВ и серийных (базовых) долот проведены в ООО «Юграбурсервис».

- месторождение (площадь) Отрадинское ГКМ;
- буровые скважины № 314-4.
- способ бурения – роторный.
- буровая установка - БУ-3Д-76, тип привода – дизельный
- буровые насосы – УНБ-600.
- система очистки промывочной жидкости – СВЛ-1, ПГ-60/300, ИГ-45М.
- компоновка бурового инструмента: долото + КЛС+УБТ-229 + УБТ-203 +УБТ-178+ СБТ-127х9,19 G-105
- литология (разбуриваемые породы) – глины темно-зеленые, темно-серые; известняк светло-серый до белого, плотный, средне крепкий; доломит коричневатого-серый, тонкокристаллический, плотный, крепкий.

*Параметры режима бурения и бурового раствора:*

- интервал бурения, м. - 30-890
- осевая нагрузка на долото, кН (т.с.) - 50-160 (5-16)
- частота вращения долота, об/мин - 60-100
- расход бурового раствора, л/сек - 56-82
- условная вязкость, сек - 45-80
- плотность промывочной жидкости- г/см<sup>3</sup> - 1,15-1,16



### 6 Результаты испытаний

Результаты испытаний экспериментальных Ш490С-ЦВ и Ш393,7С-ЦВ и серийных (базовых) долот представлены в таблицах 1 и 2.

Как видно из таблицы 1 экспериментальные долота Ш490С-ЦВ, оснащенные центральными гидромониторными насадками диффузорного типа с асимметричным шестигранным внутренним поперечным сечением по сравнению с базовой конструкцией долот Ш490С-ЦВ с насадками с круглым поперечным сечением при роторном способе бурения показали увеличение механической скорости бурения в интервале 30-280 метров на 9%.

Как видно из таблицы 2 экспериментальные долота Ш393,7С-ЦВ, оснащенные центральными гидромониторными насадками диффузорного типа с асимметричным шестигранным внутренним поперечным сечением по сравнению с базовой конструкцией долот Ш393,7С-ЦВ с насадками с круглым поперечным сечением при роторном способе бурения показали увеличение механической скорости бурения в интервале 280-890 метров на 7%.

Результаты испытаний долот Ш490С-ЦВ

Табл. 1

внутреннее поперечное сечение насадок	Кол-во долот, шт.	Интервал бурения, м.		Проходка, м	Время мех бур. час	Средние показатели на долото					
						Проходка		Время мех бурения, час		Мех. скорость,	
		от	до			м	%	час	%	м/час	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
асим. шестигранное	1	30	160	130	23,8	130	108	23,8	99	5,46	109
круглое	1	160	280	120	24	120	100	24	100	5,0	100

Результаты испытаний долот Ш393,7С-ЦВ

Табл. 2

внутреннее поперечное сечение насадок	Кол-во долот, шт.	Интервал бурения, м.		Проходка, м	Время мех бур. час	Средние показатели на долото					
						Проходка		Время мех бурения, час		Мех. скорость,	
		от	до			м	%	час	%	м/час	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
асим. шестигранное	1	280	590	310	49,0	310	103	49,0	96,5	6,32	107
круглое	1	590	890	300	50,8	300	100	50,8	100	5,9	100

### 7. Характер и уровень износа долот, их узлов, деталей и элементов

После окончания испытаний был проведен анализ характера износа экспериментальных долот Ш490С-ЦВ и Ш393,7С-ЦВ оснащенных центральными гидромониторными насадками диффузорного типа с асимметричным шестигранным внутренним поперечным сечением и базовых долот Ш490С-ЦВ и Ш393,7С-ЦВ с насадками с круглым поперечным сечением.

Анализ характера износа показал:

- износ всех отработанных долот по вооружению и опоре незначительный;

- вооружение изношено минимально и имеет незначительную потерю геометрии вооружения в основном за счет периферийных венцов шарошек;
- размыва гидромониторных узлов и выпадения насадок не зафиксировано;
- дополнительного износа вершинных, основных и периферийных венцов, связанного с определенной геометрией и ориентацией экспериментальных центральных гидромониторных насадок диффузорного типа с шестигранным асимметричным внутренним поперечным сечением не установлено;
- потеря диаметра всех долот незначительная.

### **8. Выводы и рекомендации**

В результате испытаний комиссия установила, что конструкции долот Ш490С-ЦВ и Ш393,7 С-ЦВ оснащенные центральными гидромониторными насадками диффузорного типа с асимметричным шестигранным внутренним поперечным сечением - работоспособны.

В процессе работы аварий с долотами не зафиксировано.

При роторном способе бурения долота Ш490С-ЦВ и Ш393,7С-ЦВ оснащенные центральными гидромониторными насадками диффузорного типа с асимметричным шестигранным внутренним поперечным сечением по механической скорости бурения превосходят своих аналогов с насадками с круглым поперечным сечением в верхнем интервале бурения на 9%, а в нижнем на 7%.

Комиссия по результатам испытаний рекомендует, для окончательных выводов об эффективности работы центральных гидромониторных насадок диффузорного типа с асимметричным шестигранным внутренним поперечным сечением, изготовить на ОАО «Волгабурмаш» опытно-промышленные партии долот различных типоразмеров и провести более обширные эксплуатационные испытания.


Председатель комиссии:

 И.Е. Чумаков

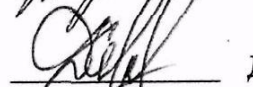
Члены комиссии:

 А.С. Зданович

 А.А. Ратников

 А.М. Макавчук

 Н.Д. Граб

 Д.Ю. Сериков



## Приложение Г

## Акты внедрения результатов работы

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ  
ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

«ПРОММАШСЕРВИС»



Адрес почтовый: 117218, Москва-218 В, а/я 19

Тел./факс: (495) 124-05-33, 124-34-33

Адрес юридический:

117218, г. Москва, ул. Кржижановского, д.14, корп.2

Сайт: <http://corp.prommash.ru/>, E-Mail: [prommashservis@list.ru](mailto:prommashservis@list.ru)

ИНН 7727143501, КПП 772701001

р/с 40702810100760002491

ОАО «МОСКОВСКИЙ КРЕДИТНЫЙ БАНК», г. Москва

К/с 30101810745250000659, БИК 044525659

Коды: ОКПО 47365909, ОКОНХ 14184

Исх.№2/4-17 от 6 апреля 2017г.

Утверждаю

Генеральный директор

ЗАО «Проммашсервис»

В.А. Боднарчук



АКТ

о внедрении результатов докторской диссертационной работы

Серикова Дмитрия Юрьевича

Комиссия в составе:

Н.Д. Граб - председатель, к.т.н., директор по производству ЗАО «Проммашсервис»;

В.В. Пронин - начальник механо-сборочного цеха ЗАО «Проммашсервис»;

С.В.Мороз – инженер по качеству ЗАО «Проммашсервис»;

составили настоящий акт о том, что результаты докторской диссертационной работы Серикова Дмитрия Юрьевича «Повышение эффективности шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением», в части разработанных и представленных автором:

- различных конструкций косозубого вооружения для наддолотных шарошечных расширителей;

- конструкций центральных и боковых гидромониторных узлов оснащенных насадками с внутренним шестигранным асимметричным сечением;

получили положительную оценку и используются ЗАО «Проммашсервис» при изготовлении различного шарошечного бурового инструмента.

В рамках внедрения вышеуказанных результатов диссертационной работы согласно Патенту РФ на изобр. №2600225 был разработан и изготавливается на постоянной основе шестিশарошечный наддолотный расширитель 6РШ-555М с разнонаправленным косозубым вооружением. Согласно Патентам №2558030 и №2567561 трехшарошечные долота различных типоразмеров оснащаются гидромониторными насадками с внутренним шестигранным асимметричным сечением.

КОПИЯ ВЫДАНА  
ДИРЕКТОРУ

А.В. Мурадов



Н.Д. Граб

В.В. Пронин

С.В. Мороз



Общество с ограниченной ответственностью  
«РосБурЧасть»

142350, Московская область, Чеховский район, деревня Ивачково,  
улица Лесная, дом 15.

Р/с №40702810304100000291 в ПАО «МИнБанк» г. Москва,  
ИНН 5048012162, КПП 504801001, К/с №30101810300000000600, БИК 044525600  
Тел/факс: (496)762-27-83, 8-901-501-14-69  
E-mail: [rbch-rus@yandex.ru](mailto:rbch-rus@yandex.ru) Сайт: [rosburchast.tiu.ru](http://rosburchast.tiu.ru)

Исх.№ 8 от 10.04.2017г.

Утверждаю

Генеральный директор

ООО «Росбурчасть»

И.В. Подуруцин



АКТ

о внедрении результатов докторской диссертационной работы

Серикова Дмитрия Юрьевича

Комиссия в составе:

С.Н. Дубинин – главный инженер ООО «Росбурчасть»;

Н.Н. Фирсов – начальник производства ООО «Росбурчасть»;

С.А.Шпунтов – начальник механо-сборочного цеха ООО «Росбурчасть»

составили настоящий акт о том, что результаты докторской диссертационной работы Серикова Дмитрия Юрьевича «Повышение эффективности шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением», в части разработанных и представленных автором:

- конструкции центральной гидромониторной насадки с внутренним асимметричным шестигранным поперечным сечением диффузорного типа:

- конструкции боковой гидромониторной насадки с внутренним асимметричным шестигранным поперечным сечением конфузорного типа:

получили положительную оценку ООО «Росбурчасть» и были рекомендованы для промышленного производства.

В рамках внедрения вышеуказанных результатов диссертационной работы согласно Патентам №2558030 и №2567561 разработаны и изготавливаются на постоянной основе гидромониторные насадки диффузорного и конфузорного типа с внутренним шестигранным асимметричным сечением различных размеров.

КОПИЯ ВЕРНА  
ПРОРЕКТОР

А.В.МУРАДОВ



Подпись: *А.В. Мурадов*  
И.В. Подуруцин  
Копия в отделе кадров

*С.Н. Дубинин*  
*Н.Н. Фирсов*  
*С.А. Шпунтов*

С.Н. Дубинин

Н.Н. Фирсов

С.А. Шпунтов





NRB-New Rock Bits s.r.o.  
Bezručova 788  
511 01 Turnov, Česká republika  
tel: +42 602 157404  
e-mail: info@nrbits.com  
www.nrbits.com



Bezručova 788, 511 01 TURNOV NRB - New Rock Bits s.r.o.  
IČO: 27587720

Утверждаю

Президент

NRB - New Rock Bits s.r.o.

А.Г. Ищук

Апрель 5, 2017

**АКТ**

о внедрении результатов докторской диссертационной работы  
Серикова Дмитрия Юрьевича

Комиссия в составе:

А.М. Назаров – председатель, вице-президент NRB - New Rock Bits s.r.o.

М.А. Тимченко – главный конструктор NRB - New Rock Bits s.r.o.;

Е.Н. Балабашина – главный технолог NRB - New Rock Bits s.r.o.,

составили настоящий акт о том, что результаты докторской диссертационной работы Серикова Дмитрия Юрьевича «Повышение эффективности шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением», в части разработанных и представленных автором:

- методики определения геометрических параметров вооружения шарошечного бурового инструмента на основе математического моделирования;
  - различных конструкций стального поверхностно-армированного фрезерованного косозубого вооружения шарошечных буровых долот;
- получили положительную оценку и используются NRB - New Rock Bits s.r.o. при разработке и производстве различных типоразмеров трехшарошечных буровых долот.

В рамках внедрения вышеуказанных результатов диссертационной работы при проектировании новых видов вооружения на NRB - New Rock Bits s.r.o. успешно используется методика определения геометрических параметров вооружения шарошечного бурового инструмента на основе математического моделирования. В соответствии с Патентом РФ на изобретение №2522608 были разработаны и изготавливаются на постоянной основе трехшарошечные буровые долота с косозубым вооружением различных типоразмеров.

А.М. Назаров  
 М.А. Тимченко  
 Е.Н. Балабашина

КОПИЯ ВЕРНА  
ДИРЕКТОР

А.В. МУРАДОВ



Подпись А.В. Мурадов  
ЗАВЕРШЕНО  
Исполнительный директор