

На правах рукописи



**МОЛОКАНОВ ДЕНИС РАВИЛЬЕВИЧ**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАГРУЖЕННОСТИ БУРИЛЬНОГО  
ИНСТРУМЕНТА ПРИ ПРОВОДКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН**

Специальность 25.00.15 – Технология бурения и освоения скважин

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ухта

2011

Диссертационная работа выполнена в Ухтинском государственном техническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук  
Хегай Валерий Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Кучерявый Василий Иванович  
кандидат технических наук  
Краснов Сергей Алексеевич

Ведущее предприятие: филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ»  
в г. Ухта

Защита состоится «14» апреля 2011 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.291.01 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета по адресу: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13.

Автореферат размещен на сайте Ухтинского государственного технического университета [www.ugtu.net](http://www.ugtu.net) в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан «11» марта 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, к.т.н., профессор



Н.М. Уляшева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Бурение горизонтальных скважин является одним из перспективных методов интенсификации добычи нефти и газа, что позволяет намного увеличить площадь фильтрации пластового флюида за счет длины горизонтального ствола.

Существует множество математических моделей производительности горизонтальных скважин от параметров траектории. Основная идея существующих моделей заключается в максимальном увеличении длины горизонтального участка ствола в продуктивном пласте, причем мощность пласта намного меньше длины горизонтального ствола. Положительные результаты достигнуты при бурении горизонтальных скважин в Италии, Дании, Нидерландах, Аргентине и России, в частности, на Федоровском, Ярегском, Усинском, Лаявожском и других месторождениях залежи нефти. Но горизонтальное бурение с большой протяженностью ствола является сложнейшей задачей в области технико-технологического строительства скважин, так как при проводке таких скважин возникают значительные силы сопротивления движению бурильной колонны, а иногда эти силы превышают общий вес бурильной колонны, расположенной выше горизонтального участка. В результате дальнейшее бурение невозможно из-за отсутствия осевой нагрузки на долото, следовательно, необходимая длина горизонтального ствола не будет достигнута.

Создание научно-обоснованной методики, предназначенной для определения осевой нагрузки на долото и возможной максимальной длины горизонтального участка, приобретает особую актуальность при бурении горизонтальных скважин на месторождениях Тимано-Печорской нефтегазовой провинции.

**Цель работы.** Развитие методов оценки нагруженности бурильного инструмента при проводке горизонтальных скважин.

### **Основные задачи исследования**

1. Анализ способов доведения осевой нагрузки до долота при бурении горизонтальных скважин.
2. Разработка математических моделей состояния бурильной колонны

для установившегося режима бурения при проводке горизонтальных скважин различных профилей.

3. Разработка алгоритма для определения осевой нагрузки при использовании различных профилей горизонтальных скважин.

4. Проведение промысловых испытаний и анализ результатов на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Коми».

5. Оценка коммерческой эффективности от внедрения рекомендаций по определению осевой нагрузки на долото.

### **Научная новизна**

1. Разработаны математические модели состояния бурильной колонны при проводке горизонтальных скважин при устойчивом режиме бурения.

2. Получены уравнения, позволяющие определить и оценить осевую нагрузку на породоразрушающий инструмент в зависимости от физико-механических свойств и геометрии системы «Бурильная колонна – забой» при проводке горизонтальных скважин, а также скважин с выходом на дневную поверхность.

3. Определены соотношения для нахождения оптимальной длины горизонтального ствола при проводке горизонтальных скважин в зависимости от скорости вращения ротора.

### **Методы решения поставленных задач**

Для решения поставленных задач использовались методы математического анализа, аналитической и теоретической механики, механики деформируемого твердого тела, вычислительной математики и программирования, проведения и обработки результатов промысловых исследований.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработанные математические модели и уравнения состояния бурильной колонны при проводке горизонтальных скважин позволяют получить информацию о усилиях, возникающих в бурильной колонне по ее длине, что способствует уточнению прочностных расчетов, а также оценить осевую нагрузку на долото в зависимости от профиля скважины.

2. Установленные диапазоны длины горизонтального ствола скважины дают возможность уже на стадии проектирования выбирать оптимальную длину горизонтального участка бурильной колонны в зависимости от профиля скважины.

3. Полученные зависимости позволяют оперативно управлять осевой нагрузкой на породоразрушающий инструмент для эффективного разрушения горной породы при бурении горизонтальных скважин, а также скважин с выходом на дневную поверхность (бестраншейная прокладка трубопроводов).

4. Результаты исследований диссертации подтверждены промышленными испытаниями на скважине № 3 Усинского месторождения и используются при разработке рабочих проектов на строительство горизонтальных скважин ООО «ПечорНИПИнефть».

#### **Основные защищаемые положения**

1. Математические модели состояния бурильной колонны при проводке горизонтальных скважин как при роторном, так и при бурении с применением забойных двигателей.

2. Уравнения для определения и оценки осевой нагрузки на долото при проводке горизонтальных скважин различных профилей.

3. Соотношения для установления оптимальной длины горизонтального ствола при проводке горизонтальных скважин в зависимости от скорости вращения ротора.

#### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

– региональный семинар «Состояние и перспективы разработки высоковязких нефтей и битумов», г. Ухта, 2007 г.;

– научно-техническая конференция преподавателей и сотрудников УГТУ, г. Ухта, 2008 г.;

– IX международная молодежная конференция «Севергеоэкотех-2008», г. Ухта, 2008 г.;

– региональная научно-техническая конференция «Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов», г.Ухта, 2008 г.;

– научно-техническая конференция преподавателей и сотрудников УГТУ, г.Ухта, 2009 г.;

– X международная молодежная конференция «Севергеоэкотех-2009», г.Ухта, 2009 г.;

– научно-техническая конференция в рамках выставки «НЕФТЬ. ГАЗ. ХИМИЯ - 2009» «Актуальные проблемы геологических исследований и разработки месторождений», посвященная 80-летию «Пермской нефти» и 45-летию ООО «ПермНИПИнефть», г.Пермь, 2009 г.;

– научно-техническая конференция преподавателей и сотрудников УГТУ, г.Ухта, 2010 г.;

– XI международная молодежная конференция «Севергеоэкотех-2010», г.Ухта, 2010 г.

**Публикации.** Результаты исследований опубликованы в 13 печатных работах, включая 6 работ в изданиях, вошедших в перечень ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 148 наименований. Содержание диссертации изложено на 164 страницах машинописного текста, включает 56 рисунков и 6 таблиц.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю заведующему кафедрой теоретической и прикладной механики, д.т.н. Хегаю В.К.; заведующему кафедрой машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности, д.т.н., профессору Быкову И.Ю.; заведующей кафедрой организации и планирования производством, к.э.н., доценту Павловской А.В.; заведующему кафедрой бурения, к.т.н., доценту Логачеву Ю.Л.; к.т.н., профессору Уляшевой Н.М. и другим сотрудникам кафедры бурения; коллективу отдела бурения ООО «ПечорНИПИнефть»; оказавшим поддержку и помощь в работе над диссертацией.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы основные проблемы темы диссертации, цель работы, основные задачи и методы исследований, научная новизна, практическая значимость и защищаемые положения.

В **первой главе** изложена актуальность бурения горизонтальных скважин, проведен литературный обзор математических моделей производительности скважин от параметров траектории ствола. Представлены примеры увеличения дебита горизонтальных скважин в несколько раз, в том числе и на месторождениях Республики Коми.

В то же время, как известно в буровой практике, при проводке наклонно-направленных и горизонтальных скважин по прежнему существует проблема поддержания, а следовательно и определения достаточной осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент, необходимой для эффективного разрушения горной породы, причиной которому являются силы сопротивления движению бурильной колонны.

Существуют разные подходы по определению основных факторов, влияющих на условия работы бурильной колонны при проводке горизонтальных скважин. Здесь отмечены работы Александрова М.М., Балицкого П.В., Близнюкова В.Ю., Богданова В.Л., Бронзова А.С., Буслаева В.Ф., Буслаева Г.В., Быкова И.Ю., Габдрахимова М.С., Галеева А.С., Гулизаде М.П., Есьмана Б.И., Иорданова Д.С., Ишемгужина Е.К., Керимова З.Г., Некрасова А.И., Оганова А.С., Оганова Г.С., Оганова С.А., Проселкова Е.Б., Проселкова Ю.М., Сарояна А.Е., Симонова В.В., Симонянца Л.Е., Студенского М.Н., Султанова Б.З., Хегая В.К., Шерстнева Н.М., Шищенко Р.И., Шлыка Ю.К., Юнина Е.К., Daring D., Radzimovsky E., Rapold K и др.

Как показал анализ проведенных ранее работ, исследований, направленных на изучение напряженного состояния бурильной колонны при проводке горизонтальной скважины, а также оценки осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент все еще недостаточны.

Проведенный анализ сравнения показателей осевых нагрузок и механиче-

ских скоростей при бурении вертикальных и горизонтальных скважин (табл. 1) в идентичных геологических условиях показал, что определение осевой нагрузки на долото станциями ГТИ при бурении горизонтальных скважин, на наш взгляд, требует научного обоснования.

Для решения этих задач необходимо разработать математические модели состояния бурильной колонны при проводке горизонтальных скважин, которые позволили бы произвести оценку нагруженности бурильного инструмента и управлять этим процессом.

Таблица 1 – Показатели осевой нагрузки и механической скорости бурения

Тип скважин	Месторождение, № скважины	Горизонт	Нагрузка, кН	Механическая скорость бурения, м/ч	Длина горизонтального ствола, м
Вертикальные и наклонно-направленные ( $\alpha < 20^\circ$ )	Усинское, №20040	C <sub>3</sub> (1230-1300 м)	100-120	11,7	-
	Усинское, №20042		100-120	12,4	-
	Усинское, №579		80-100	11,2	-
Горизонтальные	Усинское, №2ГС		80-100	7,6	640
	Усинское, №3ГС		80-100	8,0	600
	Усинское, №4ГС		80-100	7,8	590
Вертикальные и наклонно-направленные ( $\alpha < 20^\circ$ )	Кыртаельское, №231	D <sub>2st</sub> (2550-2600 м)	100-120	3,5	-
	Кыртаельское, №431		120-140	4,1	-
	Кыртаельское, №251		100-120	3,9	-
	Кыртаельское, №339		120-140	3,7	-
Горизонтальные	Кыртаельское, №341Г		180-200	0,8	210
	Кыртаельское, №253Г		240-260	1,8	290
	Кыртаельское, №222Г	200-240	1,5	200	
Вертикальные и наклонно-направленные ( $\alpha < 20^\circ$ )	Ср-Серчеюский купол, №409	P <sub>1</sub> (1400-1500 м)	130-150	7,0	-
	Ср-Серчеюский купол, №307		100-120	6,0	-
Горизонтальные	Ср-Серчеюский купол, №308		120-140	1,7	1370
	Ср-Серчеюский купол, №312		80-100	3,7	500

**Вторая глава** посвящена разработке уравнения движения БК при проводке горизонтальных скважин для различных ее участков при установившемся режиме бурения.

Как показали исследования Е.К. Юнина и В.К. Хегая наилучшими сочетаниями скорости вращения бурильной колонны и осевой нагрузки на долото будут те, которые находятся в зоне равномерного вращения инструмента, когда отсутствуют крутильные и продольные низкочастотные колебания.

Имея ввиду это обстоятельство, разработаны уравнения движения БК при



квазистатическом режиме бурения, которые позволяют проанализировать и произвести оценку нагруженности бурильного инструмента при проводке горизонтальных скважин.

Разработаны уравнения движения БК на вертикальном, наклонном, горизонтальном и криволинейном участках бурильной колонны, как при роторном, так и при бурении скважин с применением забойных двигателей.

**Третья глава** посвящена определению осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент при проводке горизонтальных скважин.

Для решения этой задачи разработаны математические модели состояния БК, состоящие из трех, четырех, пяти и семи участков (рис. 1).

Так, для скважины, состоящей из пяти участков (рис. 1, в), имеем:

1. Вертикальный участок ( $\alpha_1 = 0$ ,  $R_1 = \infty$ )

$$\frac{\partial N_1}{\partial s_1} = -q, \quad s_1 \in [0, l]. \quad (1)$$

Граничные условия:

$$1) \quad s_1 = 0: N_1(0) = N_0, \quad 2) \quad s_1 = l: N_1(l) = N_2(0).$$

2. Первый криволинейный участок ( $R_2 = \text{const}$ )

$$\frac{\partial N_2}{\partial \alpha_2} + k^* N_2 = qR_2 (k^* \sin \alpha_2 - \cos \alpha_2), \quad \alpha_2 \in [0, \alpha_2^*]. \quad (2)$$

Граничные условия:

$$1) \quad \alpha_2 = 0: N_2(0) = N_1(l), \quad 2) \quad \alpha_2 = \alpha_2^*: N_2(\alpha_2^*) = N_3(\alpha_2^*).$$

3. Второй криволинейный участок ( $R_3 = \text{const}$ )

$$\frac{\partial N_3}{\partial \alpha_3} + k^* N_3 = qR_3 (k^* \sin \alpha_3 - \cos \alpha_3), \quad \alpha_3 \in [\alpha_2^*, \alpha_3^*]. \quad (3)$$

Граничные условия:

$$1) \quad \alpha_3 = \alpha_2^*: N_3(\alpha_2^*) = N_2(\alpha_2^*), \quad 2) \quad \alpha_3 = \alpha_3^*: N_3(\alpha_3^*) = N_4(\alpha_3^*).$$

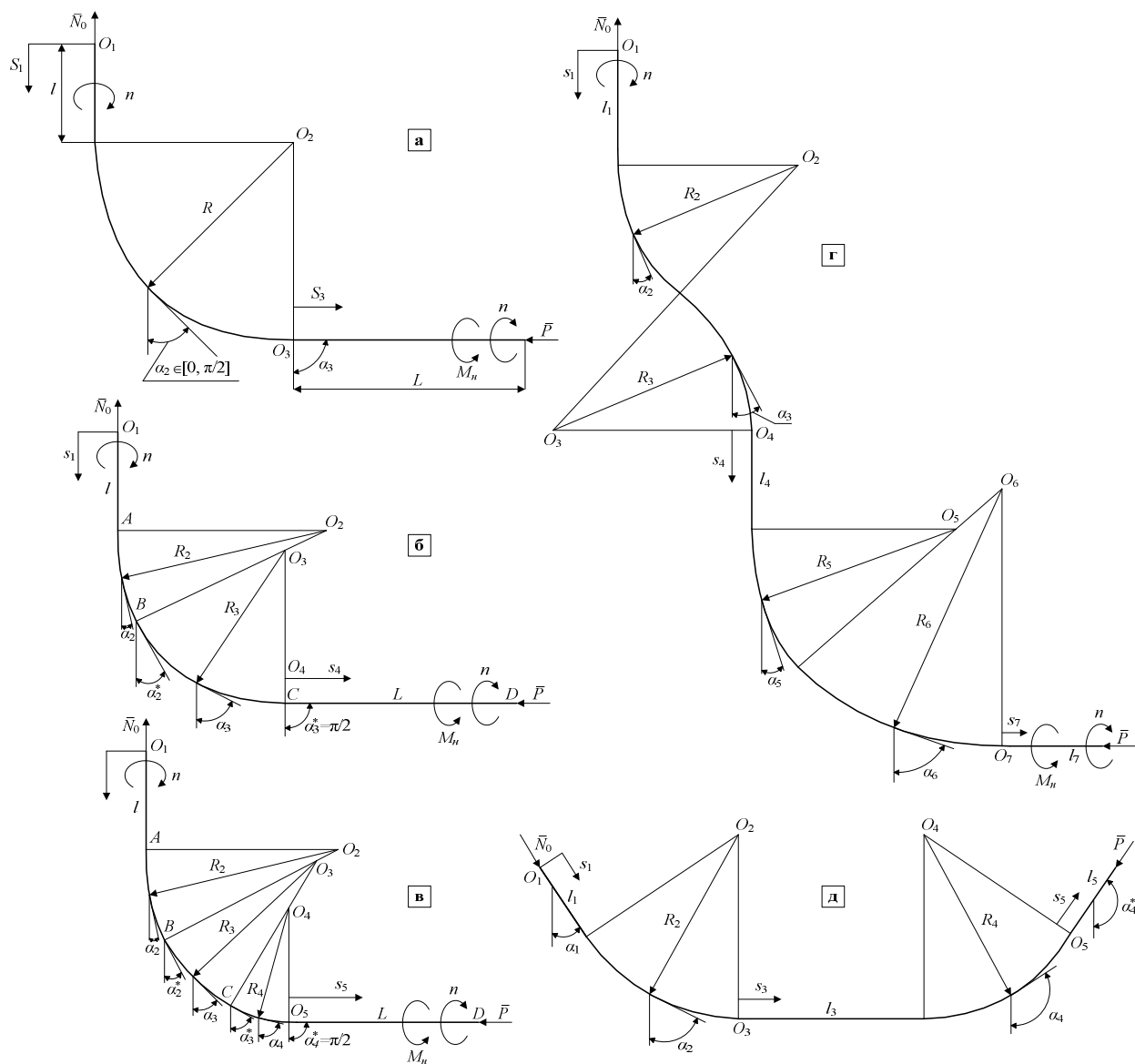


Рисунок 1 – Расчетные схемы профилей скважин

4. Третий криволинейный участок ( $R_4 = \text{const}$ )

$$\frac{\partial N_4}{\partial \alpha_4} + k^* N_4 = q R_4 (k^* \sin \alpha_4 - \cos \alpha_4), \quad \alpha_4 \in \left[ \alpha_3^*, \frac{\pi}{2} \right]. \quad (4)$$

Граничные условия:

$$1) \alpha_4 = \alpha_4^*: N_4(\alpha_3^*) = N_3(\alpha_3^*), \quad 2) \alpha_4 = \frac{\pi}{2}: N_4\left(\frac{\pi}{2}\right) = N_5(0).$$

5. Горизонтальный участок ( $\alpha_5 = \pi/2, R_5 = \infty$ )

$$\frac{\partial N_5}{\partial s_5} = k^* q, \quad s_5 \in [0, L]. \quad (5)$$

Граничные условия:

$$1) s_5 = 0: N_5(0) = N_4\left(\frac{\pi}{2}\right), 2) s_5 = L: N_5(L) = -P.$$

Решение этой задачи дает

$$\begin{aligned} P = & \left( ql - N_0 - \frac{2k^*}{1+k^{*2}} qR_2 \right) e^{-0,5k^* \pi} + \\ & + \frac{q(R_2 - R_3)}{1+k^{*2}} \left[ 2k^* \cos \alpha_2^* + (1-k^{*2}) \sin \alpha_2^* \right] e^{-k^*(0,5\pi - \alpha_2^*)} + \\ & + \frac{q(R_3 - R_4)}{1+k^{*2}} \left[ 2k^* \cos \alpha_3^* + (1-k^{*2}) \sin \alpha_3^* \right] e^{-k^*(0,5\pi - \alpha_3^*)} + \\ & + \frac{1-k^{*2}}{1+k^{*2}} qR_4 - k^* qL. \end{aligned} \quad (6)$$

Полученные уравнения нагруженности БК позволяют не только оценить осевую нагрузку на долото, но и решить задачу доставки до породоразрушающего инструмента достаточной осевой силы, необходимой для эффективного разрушения горной породы.

Из анализа уравнения (6) установлен диапазон длины горизонтального ствола скважины необходимый для эффективного разрушения горной породы для данного профиля скважины в зависимости от скорости вращения долота  $n^*$ . При выбранной оптимальной скорости вращения долота  $n = n^*$  осевая сила на породоразрушающий инструмент должна удовлетворять двум условиям:

$$1) P > 0; 2) P < P_{кр}^*.$$

Здесь  $P_{кр}^*$  – значение критической силы при  $n = n^*$ , выше которой бурильный инструмент попадает в зону низкочастотных колебаний или в зону долговременной остановки (заклинки).

С учетом этих условий определяем диапазон оптимальной длины горизонтального ствола скважины:

$$\frac{P_{кр}^*(n^*) - a}{b} < L < \frac{a}{b}, \quad (7)$$

где:

$$\begin{aligned}
 a = & \left( ql - N_0 - \frac{2k^*}{1+k^{*2}} qR_2 \right) e^{-0,5k^* \pi} + \\
 & + \frac{q(R_2 - R_3)}{1+k^{*2}} \left[ 2k^* \cos \alpha_2^* + (1 - k^{*2}) \sin \alpha_2^* \right] e^{-k^*(0,5\pi - \alpha_2^*)} + \\
 & + \frac{q(R_3 - R_4)}{1+k^{*2}} \left[ 2k^* \cos \alpha_3^* + (1 - k^{*2}) \sin \alpha_3^* \right] e^{-k^*(0,5\pi - \alpha_3^*)} + \frac{1 - k^{*2}}{1 + k^{*2}} qR_4; \\
 b = & k^* q.
 \end{aligned}$$

В данной главе проведены исследования по реальным профилям скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» ТПП «Усинскнефтегаз» и ТПП «Ухтанефтегаз», в частности, при бурении горизонтальных скважин в 2009-2010 годах №№ 308, 312 Средне-Серчеюского купола Южно-Шапкинского (рис. 1 а, б), № 3 Усинского (рис. 1 в), № 341 Кыртаельского (рис. 1 г) месторождений.

Проведен анализ зависимостей осевой нагрузки на забой от различных параметров бурильной колонны и траектории скважин, состоящих из трех, четырех, пяти и семи участков (рис. 1 а, б, в, г).

На рисунке 2 представлен фактический профиль скважины № 3 Усинского месторождения, а также КНБК, радиусы искривления  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ , зенитный угол  $\alpha_2^*$  и  $\alpha_3^*$ , длина вертикального  $l$  и горизонтального  $L$  участков, усилие на крюке  $N_0$ . Глубина скважины составляет 2085 м. Осевая нагрузка на забой скважины для представленного профиля скважины (рис. 2) определяется соотношением (6).

Графические зависимости на рис. 3 позволяют определить максимальную длину бурения горизонтального ствола при различных коэффициентах трения. Как видно из этого рисунка увеличение длины горизонтального ствола приводит к пропорциональному уменьшению осевой нагрузки и при определенной длине она может быть равна нулю. Также видно, что увеличение коэффициента трения приводит к уменьшению осевой силы  $P$  при прочих равных параметрах. Следовательно, зная  $k^*$  и силу  $P$ , необходимую для эффективного разрушения

горной породы в зависимости от всей длины БК, можно найти длину горизонтального ствола скважины.

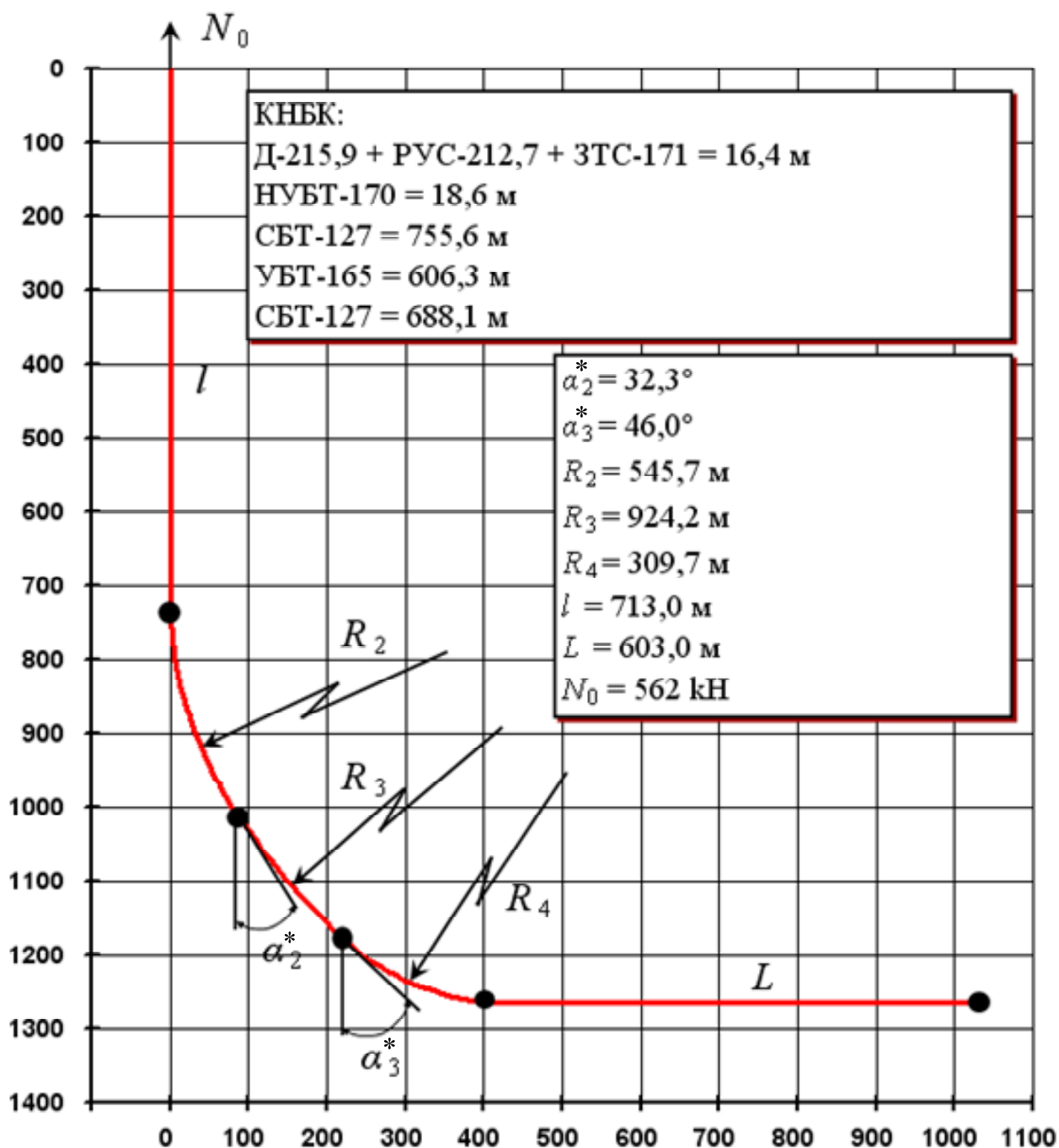


Рисунок 2 – Вертикальная проекция скважины № 3 Усинского месторождения

На рис. 4 представлена зависимость осевой нагрузки от длины вертикального участка, который играет основную роль в создании основной части полезной нагрузки на забой скважины. Как видно из рис. 4 с увеличением длины вертикального участка увеличивается и осевая нагрузка на забой. Но длина вертикального участка при проводке горизонтальных скважин зависит от выбранной

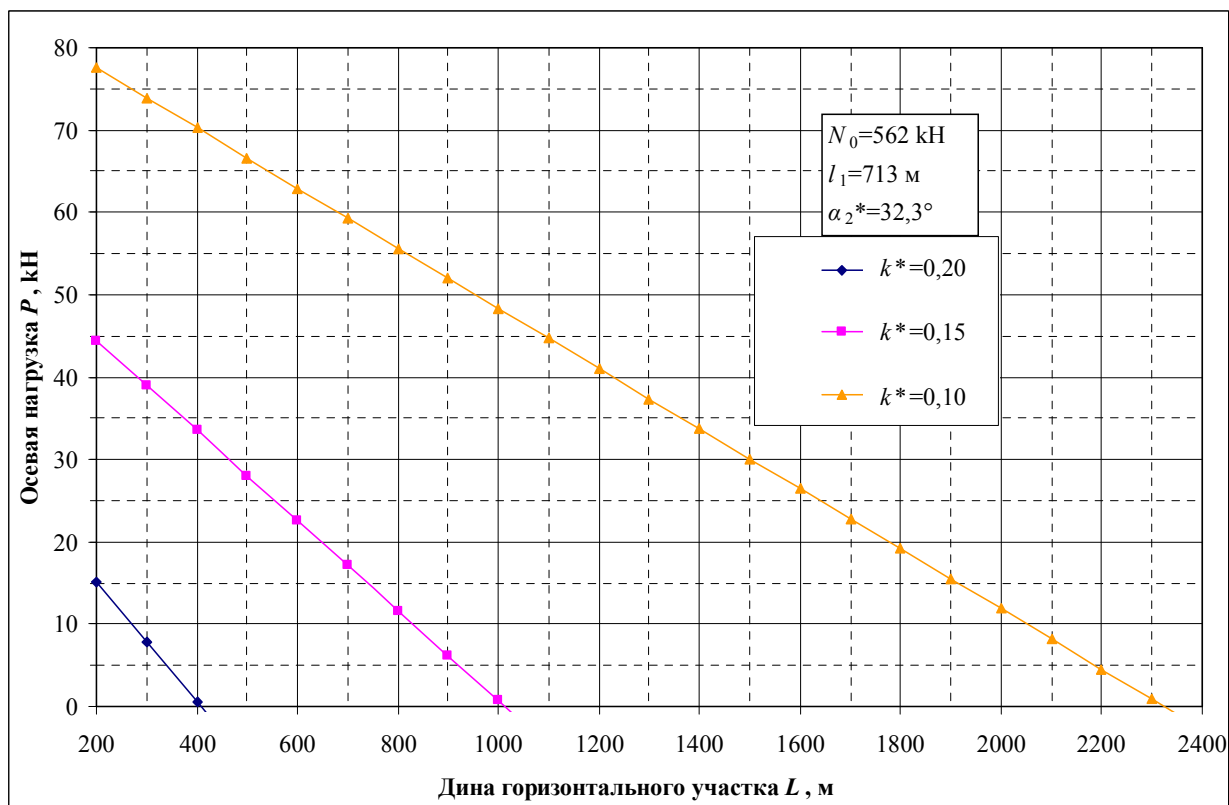


Рисунок 3 – График зависимости осевой нагрузки от длины горизонтального участка при различных значениях коэффициента трения

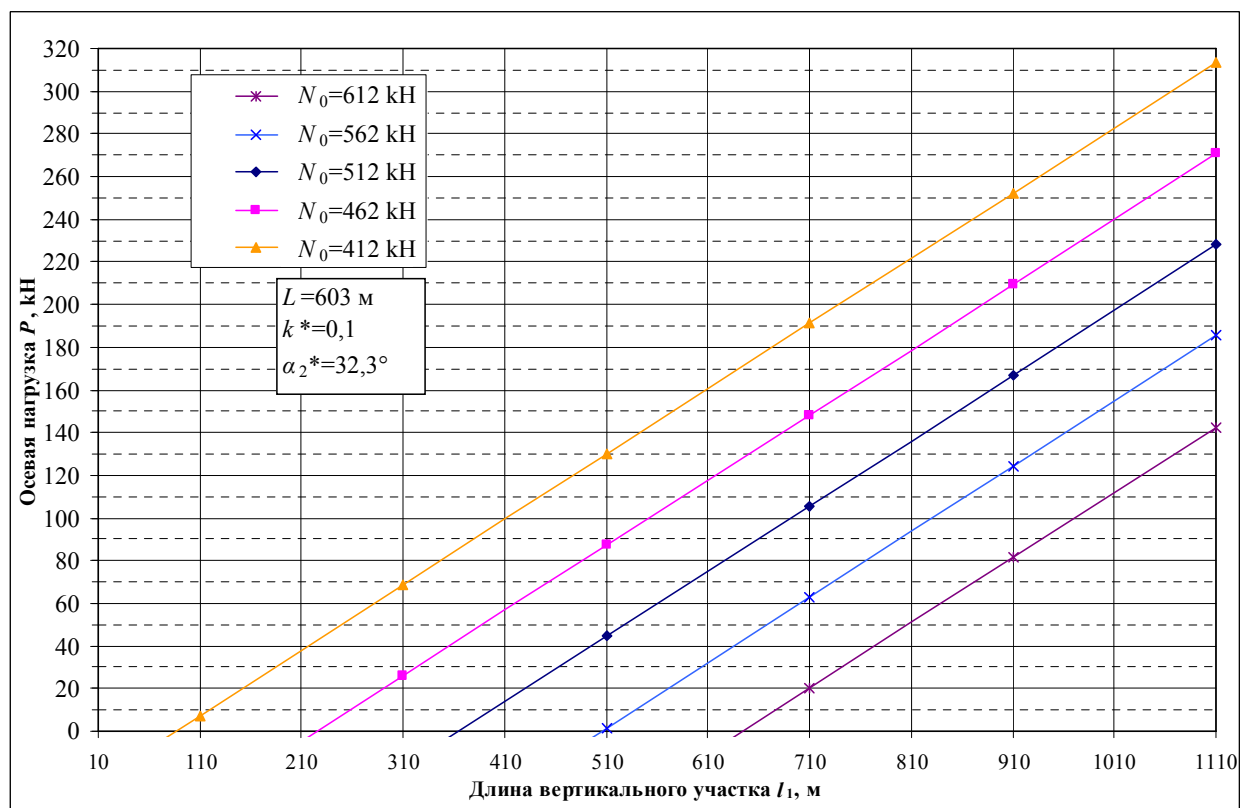


Рисунок 4 – График зависимости осевой нагрузки от длины вертикального участка при различных значениях усилия на крюке

траектории скважины. Таким образом, уже на стадии проектирования скважины, в зависимости от ее профиля, должна быть определена длина вертикального участка, вес которого, как было показано выше, является главной составляющей осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент.

Графики зависимости  $P = f(N_0)$  (рис. 5) позволяют управлять осевой нагрузкой на долото. При увеличении усилия на крюке нагрузка на забой пропорционально уменьшается. Во время бурения параметр  $N_0$  является единственным регулятором осевой нагрузки на забой скважины.

Изменение зенитного угла (рис. 6) сказывается на величине осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент. Это связано с тем, что при увеличении угла  $\alpha_2^*$  до  $\pi/2$  площадь контакта бурильного инструмента со стенкой скважины увеличивается, следовательно, возрастает сила трения, которая уменьшает полезную нагрузку, доводимую до забоя.

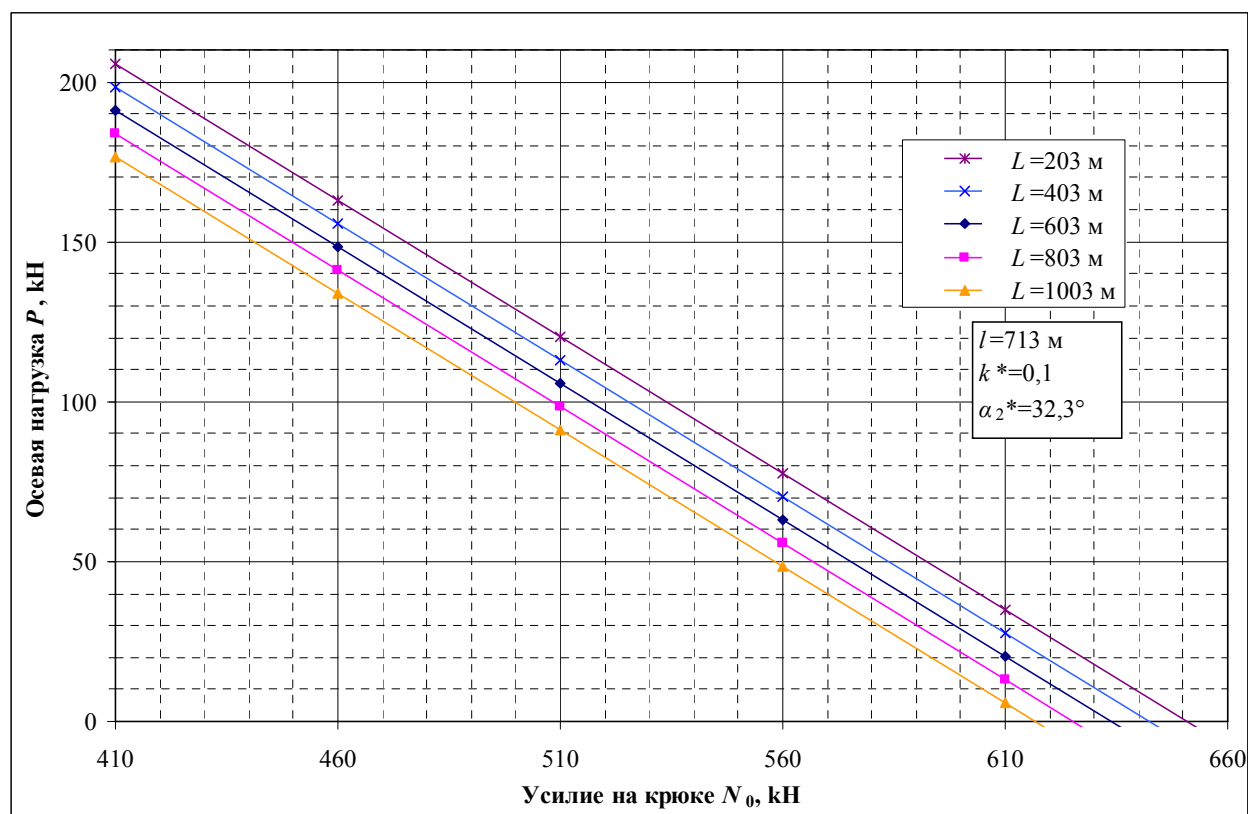


Рисунок 5 – График зависимости осевой нагрузки от усилия на крюке при различных значениях длины горизонтального участка

Из условия (7) для данного профиля определен диапазон оптимальной

длины горизонтального ствола скважины при  $n = n^*$

603 м <  $L$  < 4715 м.

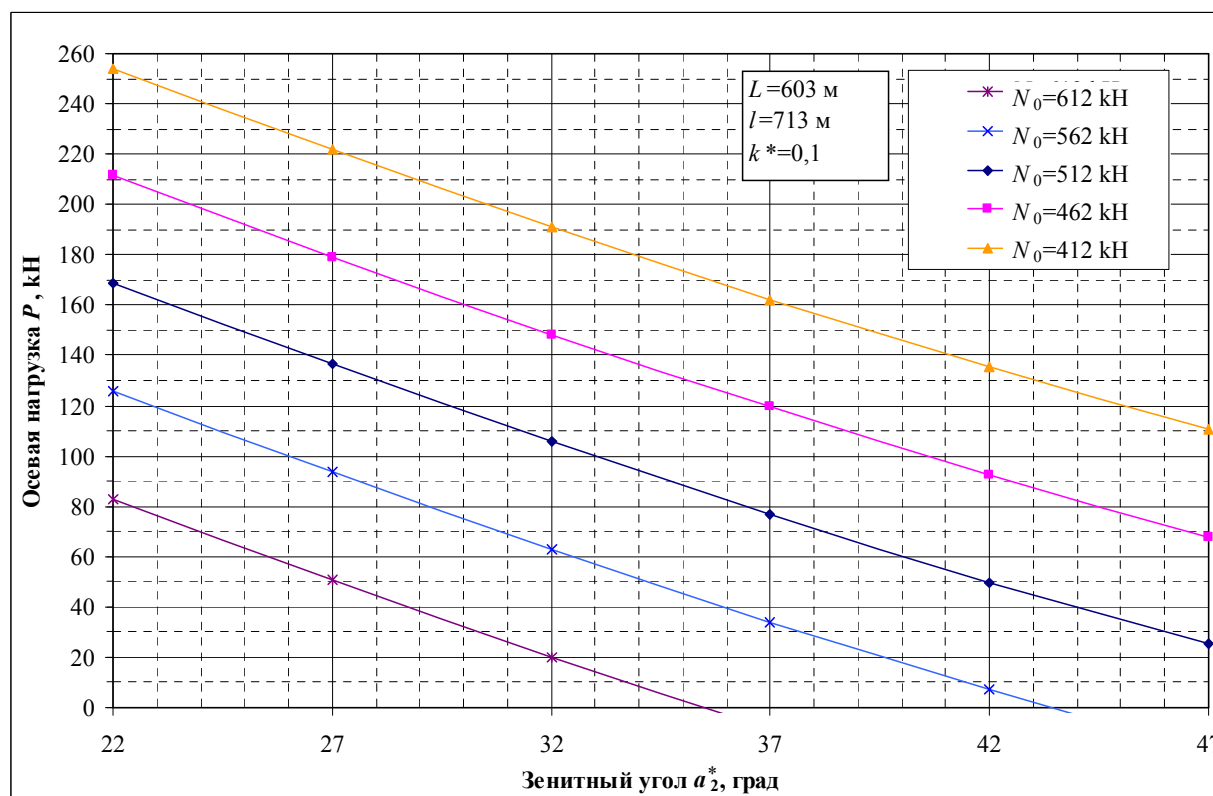


Рисунок 6 – График зависимости осевой нагрузки от зенитного угла при различных значениях усилия на крюке

Бурение скважины с выходом на поверхность (рис. 1 д) отличается от классической схемы бурения тем, что в этом случае отсутствует вертикальный участок и для формирования осевой силы на долото к бурильной колонне на устье скважины прикладывается принудительное толкающее усилие  $N_0$ .

В этом случае осевая сила  $P$  определяется соотношением

$$\begin{aligned}
 P = & \left[ N_0 - (k^* \sin \alpha_1 - \cos \alpha_1) q l_1 \right] e^{-k^*(\alpha_4^* - \alpha_1)} - \\
 & - \frac{q R_2}{1 + k^{*2}} \left[ e^{-k^*(\alpha_4^* - \alpha_1)} \left( 2k^* \cos \alpha_1 + (1 - k^{*2}) \sin \alpha_1 \right) - (1 - k^{*2}) e^{-k^*(\alpha_4^* - 0,5\pi)} \right] - \\
 & - k^* q l_3 e^{-k^*(\alpha_4^* - 0,5\pi)} - \frac{q R_4}{1 + k^{*2}} \left[ (1 - k^{*2}) e^{-k^*(\alpha_4^* - 0,5\pi)} - \sin \alpha_4^* \right] - 2k^* \cos \alpha_4^* - \\
 & - (k^* \sin \alpha_4^* - \cos \alpha_4^*) q l_5.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Как видно из рис. 7 с увеличением толкающего усилия  $N_0$  происходит возрастание осевой нагрузки на забой  $P$ , что и следовало ожидать.



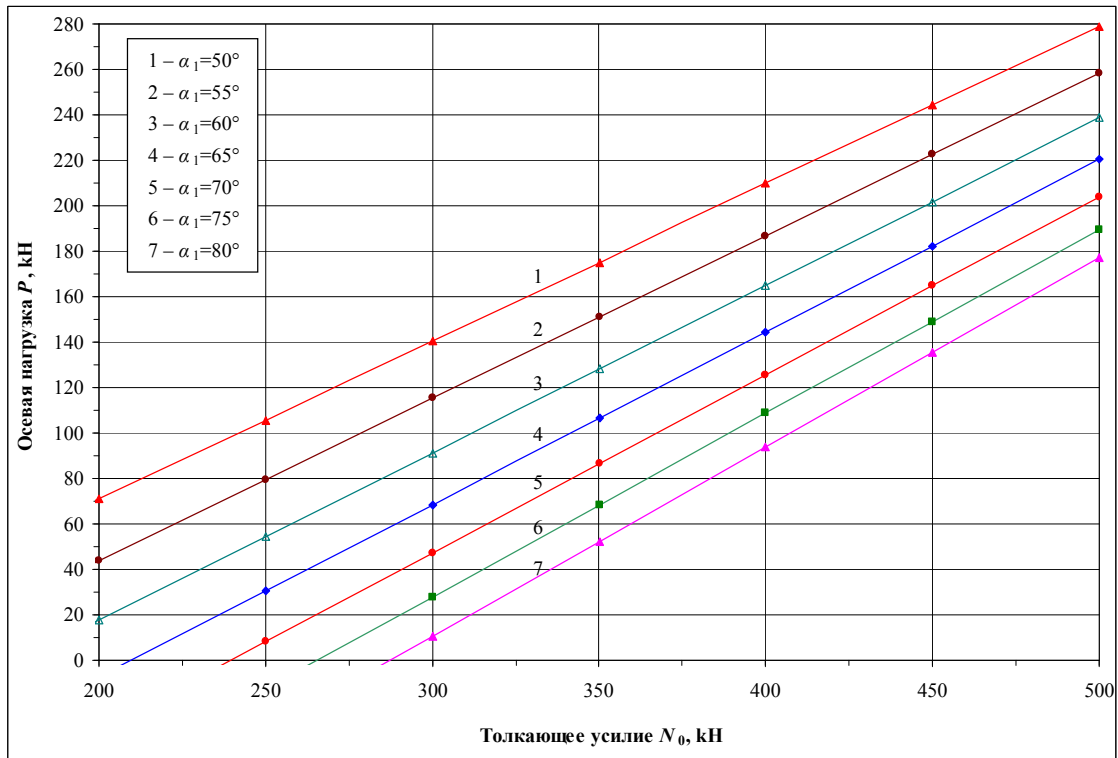


Рисунок 7 – Графики зависимости усилия  $P$  от активной силы  $N_0$  при различных значениях зенитного угла на первом участке

Как следует из рис. 8, изменение длины первого участка  $l_1$  (при прочих равных условиях) практически не влияет на величину осевой нагрузки  $P$ , тогда как увеличение угла  $\alpha_1$  приводит к значительному ее уменьшению (рисунки 7 и 8).

Для данного профиля наиболее сложным участком бурения является последний, прямолинейно-наклонный с углом  $\alpha_4^* > \pi/2$  ( $\alpha_4 \in [\pi/2, \pi)$ ). Как видно из рис. 9 увеличение угла  $\alpha_4^*$  ведет к уменьшению  $P$  и при достаточно больших углах  $\alpha_4^*$  осевая нагрузка достигает до нуля, то есть не доходит до долота.

Графические зависимости (рис. 9) позволяют анализировать и определять оптимальный угол  $\alpha_4^*$  для формирования достаточной осевой нагрузки на долото  $P$  с учетом толкающего усилия  $N_0$  и зенитного угла  $\alpha_1$ .

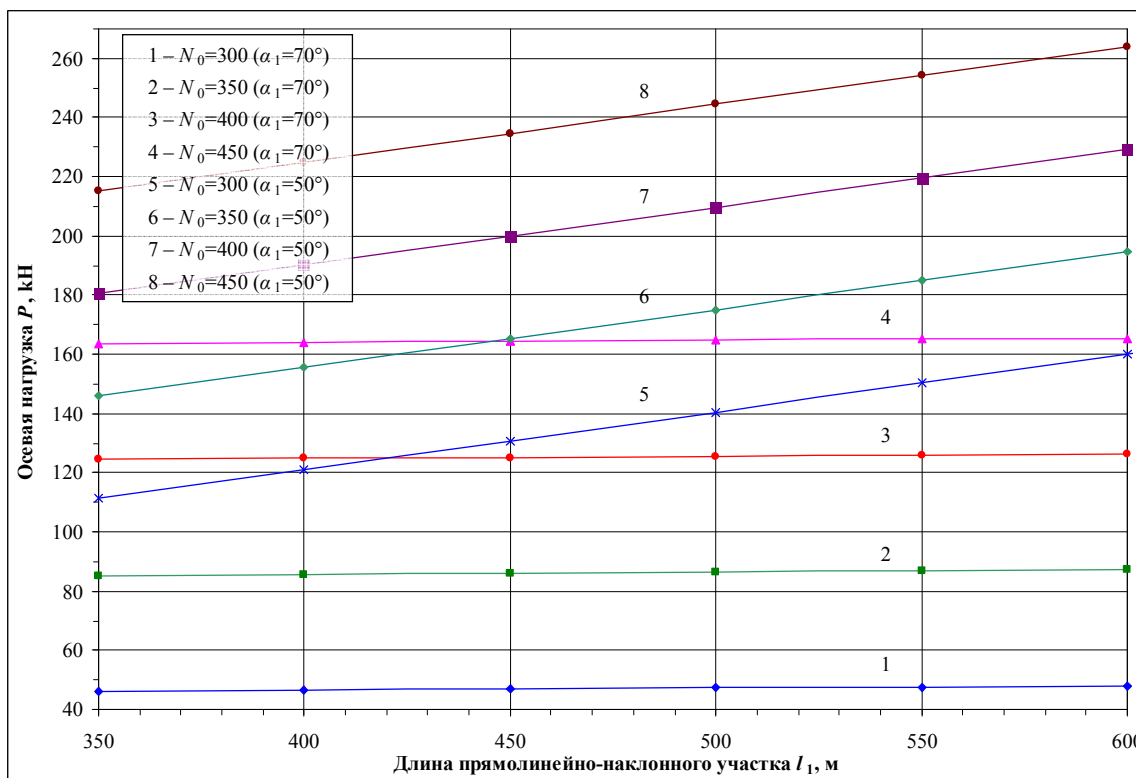


Рисунок 8 – Графики зависимости усилия  $P$  от длины первого прямолинейно-наклонного участка при различных значениях  $\alpha_1$  и  $N_0$

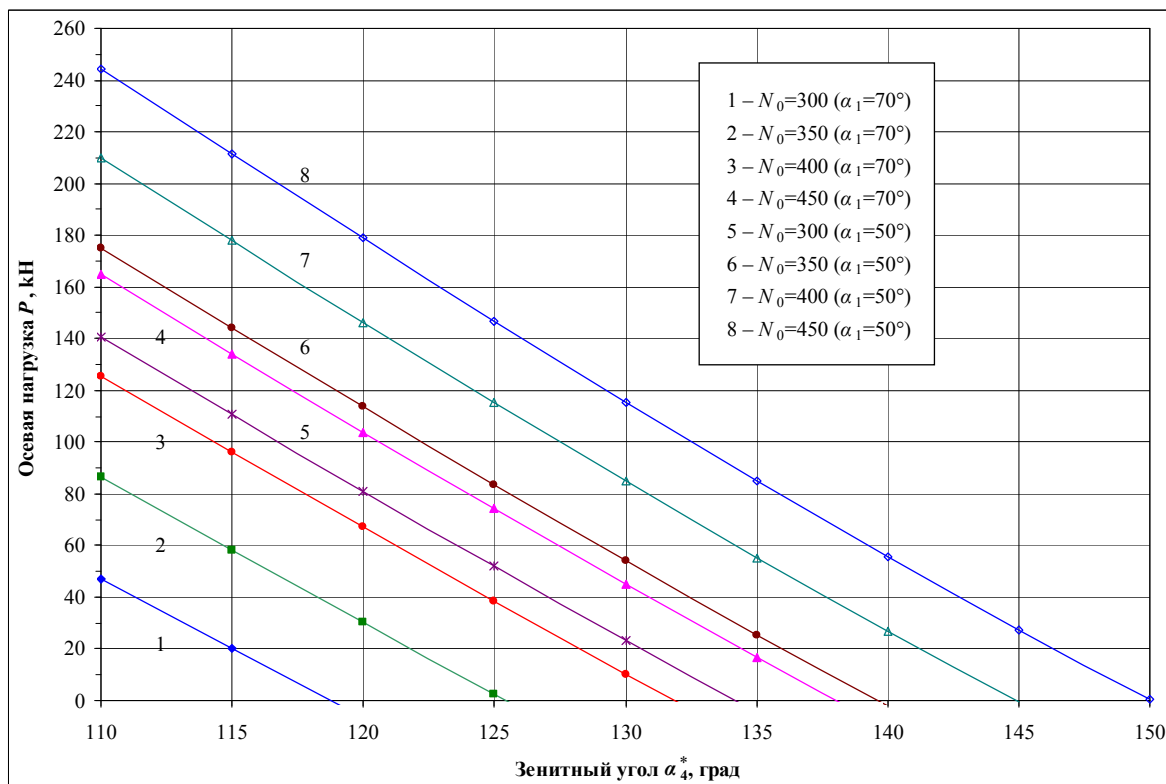


Рисунок 9 – Графики зависимости усилия  $P$  от угла наклона  $\alpha_4$  при различных значениях  $\alpha_1$  и  $N_0$

На рисунках 10 и 11 представлены графики зависимостей силы  $P$  от длины горизонтального и наклонного участков. Как видно из этих рисунков с возрастанием длины участков  $l_3$  и  $l_5$  осевая нагрузка на долото уменьшается. Это вызвано тем, что при этом увеличивается сила трения на этих участках и «отрицательный» вес на пятом (последнем) участке.

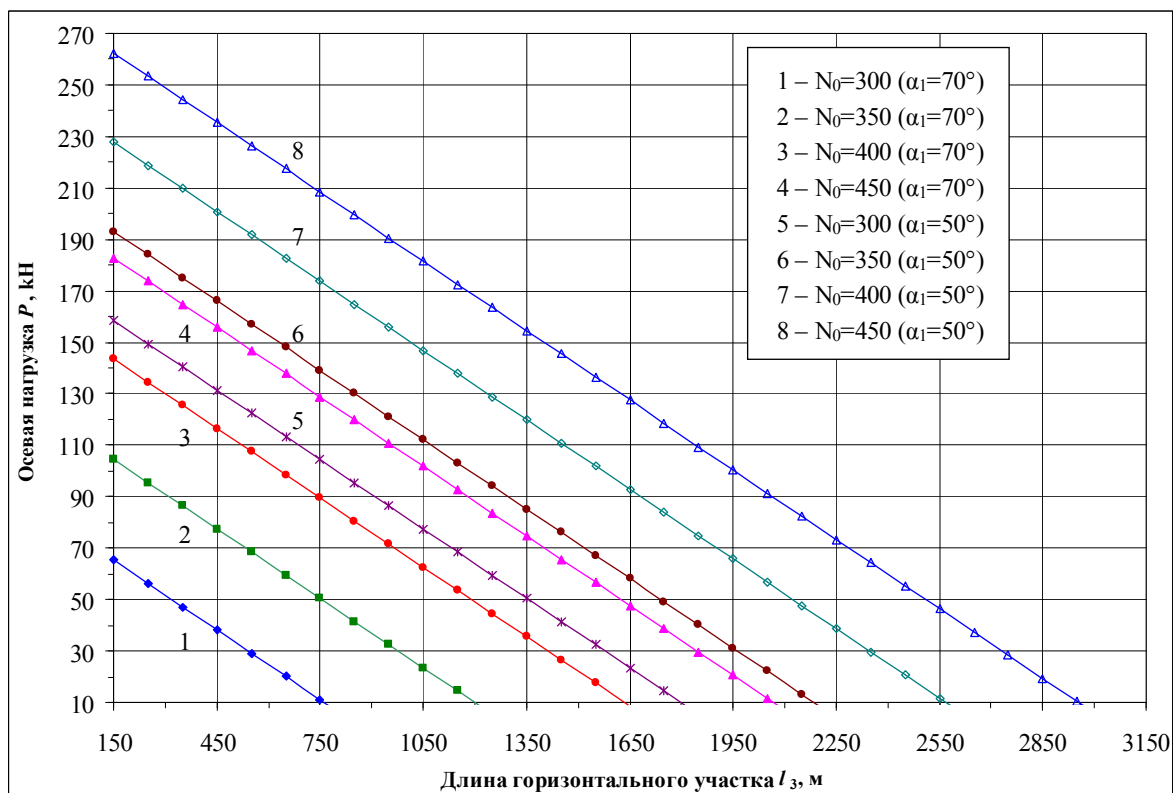


Рисунок 10 – Графики зависимости усилия  $P$  от длины горизонтального участка при различных значениях  $\alpha_1$  и  $N_0$

Таким образом, установленные закономерности (рис. 3-11) позволяют определять и проектировать необходимые параметры, влияющие на формирование осевой нагрузки.

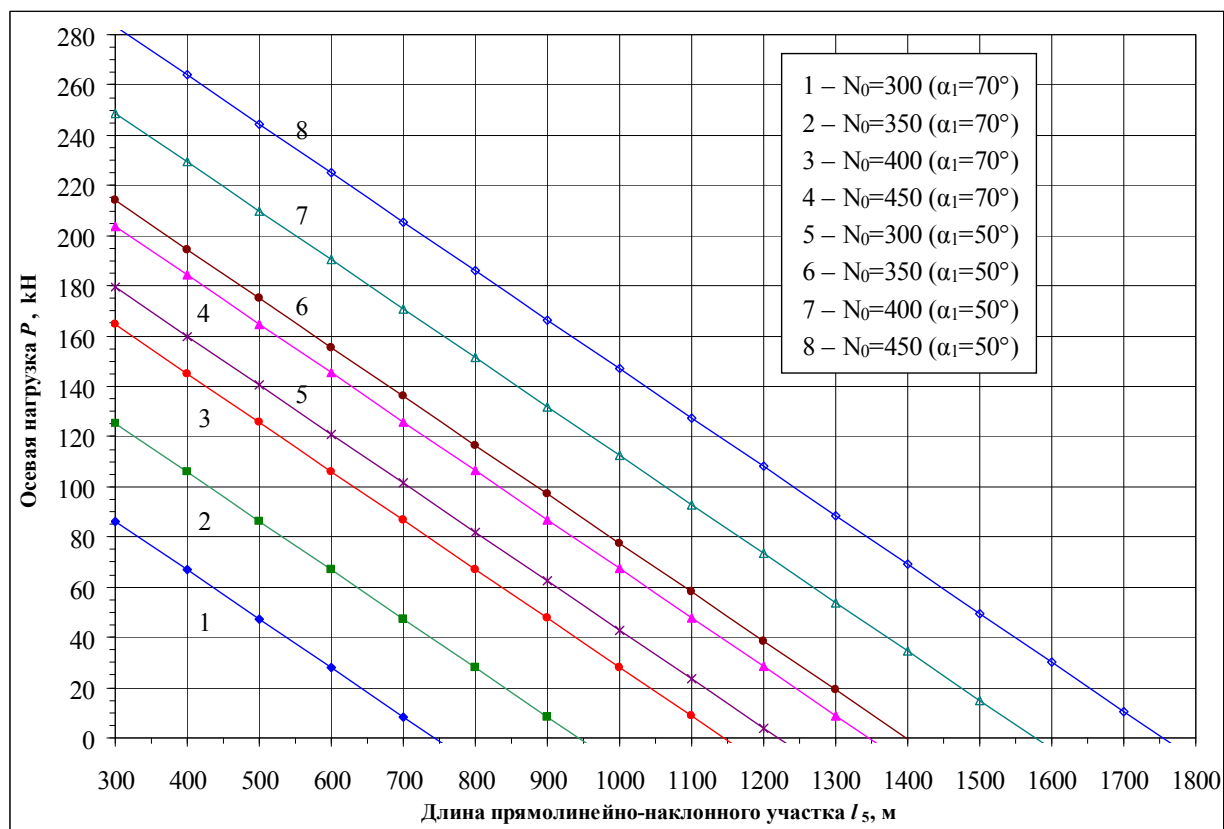


Рисунок 11 – Графики зависимости усилия  $P$  от второго прямолинейно-наклонного участка при различных значениях  $\alpha_1$  и  $N_0$

**Четвертая глава** посвящена проведению промысловых испытаний при бурении горизонтальной скважины № 3 Усинского месторождения. По результатам этих испытаний (рис. 12) в таблице 2 приведены показатели механических скоростей и осевых нагрузок при бурении вертикальных и горизонтальных скважин в идентичных геологических условиях для проведения интерпретации результатов исследований. Осевая нагрузка при бурении вертикальной скважины определяется разностью между весом БК и усилием на крюке.

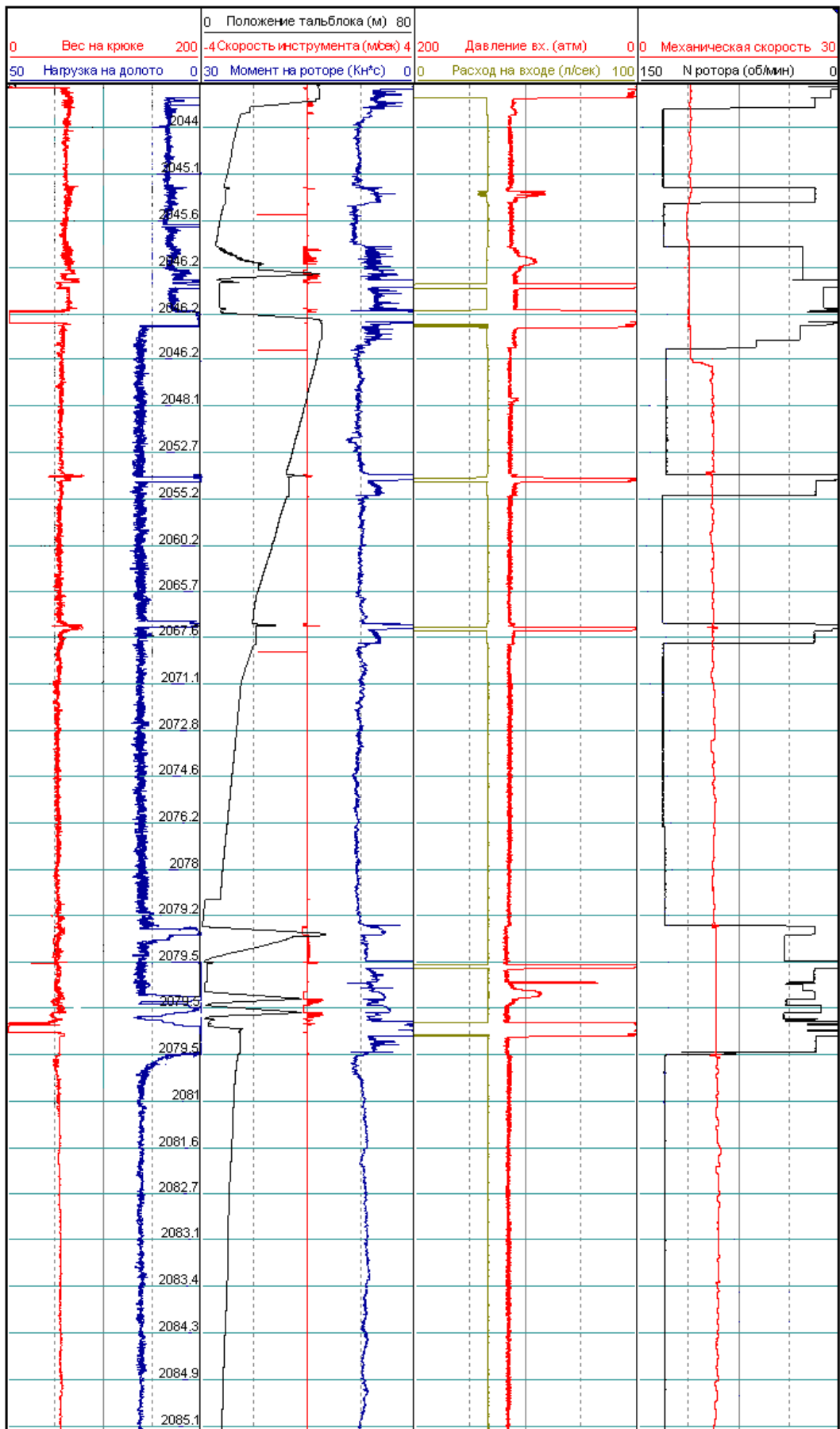


Рисунок 12 – Временная диаграмма бурения скважины № 3 Усинского месторождения

Сравнение и анализ данных теоретических и промысловых исследований при проводке данной скважины показало достаточную сходимость этих результатов, то есть  $P_{\text{расч}} \approx P_{\text{вГТИ}}$  и  $V_{\text{и}} \approx V_{\text{в}}$  (разница до 20 %), что подтверждает корректность математической модели для определения и оценки осевой нагрузки на долото при бурении горизонтальных скважин.

Таблица 2 – Показатели осевой нагрузки и механической скорости бурения

Источник информации	Месторождение, № скважины	Горизонт	Нагрузка, кН	Механическая скорость бурения, м/ч
Вертикальные и наклонно-направленные ( $\alpha < 20^\circ$ )				
ГТИ	Усинское, №20040	С <sub>3</sub> (1230-1300 м)	$P_{\text{вГТИ}} = 100-120$	$V_{\text{в}} = 11,7$
	Усинское, №20042		$P_{\text{вГТИ}} = 100-120$	$V_{\text{в}} = 12,4$
	Усинское, №579		$P_{\text{вГТИ}} = 80-100$	$V_{\text{в}} = 11,2$
Горизонтальные				
ГТИ	Усинское, №3 (до испытаний)	С <sub>3</sub> (1230-1300 м)	$P_{\text{ГТИ}} = 100$	$V = 8,0$
Расчет			$P_{\text{расч}} = 63$	
ГТИ	Усинское, №3 (при проведении испытаний)		$P_{\text{ГТИ}} = 140$	$V_{\text{и}} = 11,0$
Расчет			$P_{\text{расч}} = 100$	

Результаты исследования диссертационной работы использованы при разработке групповых рабочих проектов на строительство горизонтальных эксплуатационных скважин №№ 7, 8 на Усинском месторождении, строительство эксплуатационных (горизонтальных №№ 308Г, 312Г и наклонно-направленных №№ 304, 305, 306, 307) скважин Средне-Серчеюского купола Южно-Шапкинское месторождения, строительство паронагнетательных горизонтальных скважин №№ 5, 6 на Усинском месторождении. Проекты разработаны ООО «ПечорНИПИнефть», организация-заказчик ООО «ЛУКОЙЛ-Коми».

**В пятой главе** произведен расчет эксплуатационных затрат и годового экономического эффекта за счет увеличения механической скорости бурения на 35%, полученной при промысловых испытаниях (табл. 3).

Годовая экономия затрат составила 1359681 руб. Результаты расчета коммерческой эффективности определения достоверной осевой нагрузки на долото под эксплуатационную колонну на горизонтальных скважинах Усинского месторождения показали, что чистый дисконтированный доход (ЧДД) составил 1397352 руб., индекс доходности – 3 руб. на 1 рубль капитальных вложений,

внутренняя норма доходности –144 %, срок окупаемости –1,74 года.

Таблица 3 – Показатели экономии эксплуатационных затрат и коммерческой эффективности оптимизации осевой нагрузки и скорости вращения БК

Наименование показателей	Результаты расчета
Экономия эксплуатационных затрат на одну скважину, руб.	271936
Экономия себестоимости метра проходки, руб./м	
- в интервале под эксплуатационную колонну	322
- всего по скважине	130
Годовая экономия затрат, руб.	1 359 681
Чистый дисконтированный доход, руб.	1 397 352
Индекс доходности, руб./руб.	3,00
Внутренняя норма доходности, %	144
Срок окупаемости, лет	1,74

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны математические модели для исследования напряженного состояния бурильной колонны при проводке горизонтальных скважин и скважин с выходом на поверхность при устойчивом режиме бурения.

2. Определены зависимости осевой нагрузки на долото от усилия на крюке, физико-механических и геометрических характеристик колонны, которые позволяют формировать и регулировать необходимую нагрузку на забой скважины.

3. Определены соотношения для определения оптимальной длины горизонтального ствола для разных профилей горизонтальных скважин.

4. Результаты промысловых испытаний на скважине № 3 Усинского месторождения подтвердили корректность математической модели для оценки нагруженности бурильной колонны. Определены необходимые осевые нагрузки на забой при бурении горизонтальных скважин различных профилей.

5. Результаты исследования диссертационной работы использованы при разработке рабочих проектов на строительство горизонтальных скважин ООО «ПечорНИПИнефть».

6. Экономический эффект от внедрения результатов исследования составил 1359681 руб.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Буслаев Г.В. Совершенствование технико-технологических решений при бестраншейной прокладке трубопроводов методом направленного бурения / Г.В. Буслаев, Д.Р. Молоканов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2006. – № 12. – С. 23-24.
2. Молоканов Д.Р. Технология строительства горизонтальных паронагнетательных и добывающих скважин на опытных участках ОПУ-4 и ОПУ-5 Ярегского месторождения тяжелой нефти / Д.Р. Молоканов, Д.С. Лопарев // Нефтепромысловое дело. – 2010. – № 5. – С. 36-40.
3. Молоканов Д.Р. Вопросы и способы снижения сил сопротивления при бурении горизонтальных скважин / Д.Р. Молоканов, Г.В. Буслаев // Инженер-нефтяник. – 2008. – № 3. – С. 16-17.
4. Хегай В.К. К вопросу оценки осевой нагрузки при наклонном бурении / В.К. Хегай, Д.Р. Молоканов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 5. – С. 15-18.
5. Хегай В.К. Оценка осевой нагрузки на долото при наклонно направленном бурении / В.К. Хегай, Д.Р. Молоканов // Нефть и газ. – 2009. – № 6. – С. 32-37.
6. Хегай В.К. Об оценке осевой нагрузки на долото при бурении скважин сложной конфигурации / В.К. Хегай, Д.Р. Молоканов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 12. – С. 5-9.
7. Буслаев В.Ф. Снижение сил сопротивления при бурении горизонтальных скважин за счет протяженности ствола / В.Ф. Буслаев, Д.Р. Молоканов // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. – 2008. – № 2. – С. 26-29.
8. Буслаев В.Ф. Снижение сил сопротивления при бурении горизонтальных скважин за счет протяженности ствола / В.Ф. Буслаев, Д.Р. Молоканов // IX международная молодежная конференция «Севергеоэкотех-2008»: материалы конференции (19-21 марта 2008 г., Ухта): в 3 ч., ч. 2. – Ухта: УГТУ, 2008. – С.



55-59.

9. Буслаев Г.В. Техничко-технологические решения по бурению и креплению горизонтальных скважин с неглубоким заложением ствола / Г.В. Буслаев, О.В. Шалимова, А.В. Юдин, Д.Р. Молоканов // Проблемы разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов: материалы региональной научно-технической конференции (20-21 ноября 2008 г.) / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2009. – С. 76-80.

10. Молоканов Д.Р. Определение осевой нагрузки на долото при вращении бурильной колонны / Д.Р. Молоканов, В.К. Хегай, Г.В. Буслаев // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (15-18 апреля): в 2 ч.; I / под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2008. – С. 133-137.

11. Молоканов Д.Р. Повышение эффективности бурения горизонтальных скважин с учетом динамики бурильной колонны / Д.Р. Молоканов, Г.В. Буслаев, В.К. Хегай, А.В. Мануйлов // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. – 2008. – № 2. – С. 26-29.

12. Хегай В.К. Определение резонансных частот неоднородной бурильной колонны (БК) / В.К. Хегай, Д.Р. Молоканов, К.В. Хегай // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (14-17 апреля): в 2 ч.; I/под ред. Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2009. – С. 79-84.

13. Цхадая Н.Д. Развитие систем разработки, технологии и техники строительства скважин для добычи высоковязких нефтей / Н.Д. Цхадая, В.Ф. Буслаев, Д.Р. Молоканов, С.А. Кейн, Г.В. Буслаев, Д.А. Приходько // Состояние и перспективы разработки высоковязких нефтей и битумов, 23 ноября 2007 г.: материалы регионального семинара – Ухта: УГТУ, 2008. – С. 17-25.