

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Кубанский государственный технологический университет»
(ФГБОУ ВПО «КубГТУ»)

На правах рукописи



Солодовник Дмитрий Васильевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО МАССООБМЕННОГО
УСТРОЙСТВА ДЛЯ АППАРАТОВ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕВОДОРОДНОГО
СЫРЬЯ**

Специальность: 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая от-
расль)»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Кунина П.С.

Краснодар 2016 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Анализ существующих типов контактных устройств	10
1.2 Принципиальные схемы работы контактных устройств	20
1.3 Требования, предъявляемые к контактным устройствам колонных аппаратов	26
1.4 Области применения центробежных контактных устройств	28
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО МАССООБМЕННОГО УСТРОЙСТВА	50
3 ОПЫТНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	59
3.1 Разработка экспериментальной модели центробежного массообменного устройства	59
3.2 Планирование испытаний экспериментальной модели	68
3.2.1 Принцип работы стенда для определения капельного уноса жидкости и гидродинамического сопротивления центробежного массообменного устройства	69
3.2.2 Методика проведения эксперимента по определению капельного уноса жидкости и гидродинамического сопротивления центробежного массообменного устройства	72
3.2.3 Аэродинамические исследования прямоточного центробежного массообменного элемента	73
3.2.4 Экспериментальный стенд для аэродинамического исследования центробежного массообменного элемента	75
3.2.5 Методика проведения эксперимента по определению аэродинамических исследований центробежного массообменного элемента	77

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	81
4.1 Определение эффективной модели центробежного массообменного устройства	81
4.2 Результаты аэродинамических исследований.....	102
5 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	111
5.1 Принципиальная схема установки	115
5.2 Колонное оборудование	118
ВЫВОДЫ	125
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, ТЕРМИНОВ	127
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	128
Приложение А	137
приложение Б.....	140
Приложение В.....	143
Приложение Г	144
Приложение Д.....	145
Приложение Е	146

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Попутный нефтяной газ является очень важным и ценным углеводородным сырьем наряду с нефтью и природным газом. Сегодня, во время нарастающего дефицита энергоносителей, рациональное использование попутного нефтяного газа является неотъемлемой частью эффективного энергопользования и одним из важнейших показателей уровня промышленного развития страны.

На сегодняшний день большинство нефте- и газодобывающих и перерабатывающих предприятий при подготовке и переработке углеводородного сырья используют такие массообменные процессы как ректификация, адсорбция, абсорбция и т.д. Повышение эффективности и производительности таких процессов за счет качественного совершенствования технологического оборудования позволит значительно увеличить доход предприятий и повысить качество и количество конечного продукта.

В этой группе особенно выделяются аппараты с центробежными контактными устройствами. Центробежные массообменные контактные устройства по своим характеристикам (высокая производительность и эффективность при минимальных габаритно-массовых размерах) наиболее подходят для решения проблем снижения габаритно-массовых характеристик нового оборудования или повышения производительности действующих массообменных аппаратов. Известно, что в значительной степени от эффективности и массогабаритных характеристик работы массообменной и разделительной аппаратуры зависят количество и качество вырабатываемых продуктов, эксплуатационные затраты, капиталовложения и межремонтный период технологических установок. Эффективность работы колонного оборудования определяется эффективностью работы его внутренних элементов, так называемых, массообменных контактных устройств, наиболее перспективными из которых являются тарелки с центробежными массообменными элементами. Разработка такой высокоэффективной и высокопроизводительной массообменной тарелки является крайне актуальной задачей для нефтегазоперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Кроме того, важной задачей

является разработка комплексной и достоверной методики расчета нового контактного устройства с определением полного комплекса гидравлических параметров:

- гидравлического сопротивления центробежных массообменных элементов, позволяющего оценить резервы по давлению и с достаточной степенью точности заложить в расчет технологической схемы перепад давления на колонном аппарате;

- диапазон скорости газожидкостного потока в колонне, позволяющий вести технологический процесс без потери качества продукции – так называемой минимальной производительности;

- величину капельного уноса, зависящую от фактора скорости газожидкостного потока, что заметно влияет на эффективность работы технологического процесса;

Поэтому на сегодняшний день весьма актуальна тема исследования таких устройств с целью повышения их эффективности и производительности.

Цель работы и основные задачи исследования

Целью работы разработка нового высокоэффективного и высокопроизводительного контактного устройства, позволяющего снизить габаритно-массовые характеристики колонных аппаратов с центробежными массообменными элементами и повысить их производительность.

Задачи исследования:

Для достижения цели исследования были поставлены и решены следующие задачи:

- анализ существующих конструкций центробежных устройств с целью выявления их достоинств и недостатков;

- проведены гидравлические испытания на режимах близких к производственным опытных образцов центробежных массообменных устройств на специально изготовленном лабораторном гидродинамическом стенде;

– на основании экспериментальных данных разработана методика расчета капельного уноса и гидравлического сопротивления – параметров определяющих диапазон эффективной работы центробежных массообменных устройств;

– проведены аэродинамические исследования центробежного массообменного элемента в целях получения характеристик полей движения в закрученном потоке;

– осуществлено промышленное внедрение центробежного массообменного устройства в колонный аппарат технологической установки подготовки нефтяного газа и проверена достоверность разработанной методики расчета.

Научная новизна

1. На основании поэлементного анализа существующих массообменных устройств предложена принципиальная схема конструкции центробежного массообменного устройства, позволяющая устранить их основной недостаток – высокий капельный унос и гидравлическое сопротивление

2. Разработаны основы комплексной методики расчета центробежных массообменных устройств с расчетом всех влияющих гидродинамических параметров, которая может быть использована для проведения поверочных расчетов уже эксплуатируемых промышленных колонных аппаратов с центробежными массообменными элементами.

3. Исследованы аэродинамические свойства центробежного массообменного элемента в целях получения характеристик полей движения в закрученном потоке.

4. Автором получена зависимость скорости потока и угла закрутки потока от относительного радиуса центробежного массообменного элемента;

Методы исследований:

В исследованиях использовались методы планирования экспериментов, практические методы экспериментального исследования, методы системного анализа эксплуатации технологического оборудования, методы математического моделирования идентификационных параметров контактных устройств, адекватно

отражающих процессы гидродинамики и массообмена на исследуемых элементах в рамках поставленной задачи.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Конструкция центробежного массообменного устройства с улучшенными показателями уменьшения капельного уноса жидкости и гидравлического сопротивления;

2. Результаты гидравлических испытаний на режимах близких к производственным опытных образцов центробежных массообменных устройств на специально изготовленном лабораторном гидродинамическом стенде;

3. Методика расчета капельного уноса и гидравлического сопротивления – параметров определяющих диапазон эффективной работы центробежных массообменных устройств;

4. Зависимость скорости потока и угла закрутки потока от относительного радиуса центробежного массообменного элемента;

Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в разработке вариантов конструкций моделей центробежного массообменного элемента, проведении опытных испытаний на гидродинамическом стенде при режимах приближенных к производственным, разработке методики расчета гидродинамических характеристик и разработке теоретических основ новой методики определения капельного уноса.

Обоснованность и достоверность результатов. Все основные результаты, полученные в диссертационной работе, обоснованы высоким теоретическим, методическим и экспериментальным уровнем проведенных исследований. Достоверность результатов обеспечивается использованием современных средств измерений и стандартизованных методик проведения исследований, а так же методов статистической обработки данных.

Практическая значимость и реализация результатов работы

Разработана и запатентована конструкция центробежного массообменного устройства, позволяющая устранить их основной недостаток – высокий капельный унос и гидравлическое сопротивление (особенно при колебаниях расхода и

состава сырья, что характерно для промысловых условий) за счет внесения конструктивных особенностей, внедренных в ходе экспериментального исследования. Внедрение в производство, разработанного автором центробежноконтактного устройства позволит:

- решить задачу увеличения производительности установок нефте- и газоподготовки путем замены контактных устройств, уже установленных в колоннах;
- повысить степень энергосбережения на производстве, за счет более эффективных показателей работы массообменных устройств на установках с колонными аппаратами;
- снизить металлоемкости при производстве новых колонных аппаратов с установленными центробежными массообменными устройствами, а именно уменьшения их высоты, за счет более высоких эксплуатационных показателей данных контактных устройств и меньшего межтарельчатого расстояния;

Данная модель нашла применение в «опытно-экспериментальной установке по обработке технологии переработки углеводородного сырья в п. Афипский». Располагается опытно-экспериментальная установка в п. Афипский Краснодарского края (бывшая производственная база ОАО «НИПИГазпереработка»)

Результаты промышленных испытаний показывают, что расхождение показаний количества уноса жидкости на 1 элемент и показания гидравлического сопротивления ЦМЭ относительно экспериментальных исследований и математического моделирования, не превышает 5%. Это доказывает точность проведения исследований, а так же подтверждает высокую эффективность разработанной модели.

Так же были разработаны два стенда для проведения экспериментальных исследований центробежных элементов, которые в дальнейшем послужат для исследования вновь разрабатываемых моделей.

Публикации результатов работы

По теме диссертации опубликовано 4 печатных работ, в том числе 2 издания, рекомендованных ВАК РФ (Скопус), 2 патента РФ.

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на:

- Международная научно-практическая конференция «Совершенствование процессов переработки попутного нефтяного газа – 2014», 22 сентября 2014 г. — 27 сентября 2014 г. (г. Анапа);

- Конкурс научно-технических работ ОАО «НИПИГазпереработка», 2013г. (г. Краснодар);

- Конкурс молодых работников и специалистов ОАО «НИПИГазпереработка» на лучшую научно-техническую работу (г. Краснодар, 2014г.);

- XVII Международная молодежная научная конференция «севергеоэкотех-2016» , г. Ухта, 23-25 марта 2016г.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, основных выводов и рекомендаций, списка использованных источников (101 наименований). Работа изложена на 146 стр. машинописного текста, содержит 16 таблиц и 51 рисунок.

1 МАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процессы переработки нефти и газа постоянно претерпевают в своем развитии как качественные, так и количественные изменения, вытекающие из задач развития повышения производительности оборудования нефтегазовых комплексов. В настоящее время, с целью снижения энергоемкости технологических процессов, а так же капитальных и эксплуатационных затрат в нефтегазоперерабатывающей и нефтехимической промышленности широкое применение находят совмещенные процессы, для которых характерно использование многофункциональных аппаратов с одновременным протеканием различных стадий реакции, массопереноса и последующего разделения контактирующих фаз.

1.1 Анализ существующих типов контактных устройств

В современных ректификационных и абсорбционных установках используются различные контактные устройства. Общепринятой классификации их до сих пор не имеется. Различные авторы по-разному классифицируют контактные устройства. Рассмотрим некоторые из предлагаемых схем. А. Г. Евстафьев [9] предлагает классифицировать контактные устройства в зависимости от относительного движения фаз. По этому принципу все существующие колонные аппараты подразделяются на четыре группы: перекрестного типа, полного смешения, противоточные и прямоточные. Дальнейшая классификация зависит от конструкции контактных элементов (Рисунок 1.1).

Приведенная классификация имеет некоторые недостатки. Прежде всего, в ней не отражены группы контактных устройств, например ротационные и насадочные контактные устройства. Кроме того, к аппаратам полного смешения следовало бы отнести все типы провальных тарелок. Известно, что в провальном режиме могут работать и клапанные тарелки. Поэтому их следовало бы отнести и к группе контактных устройств полного смешения.

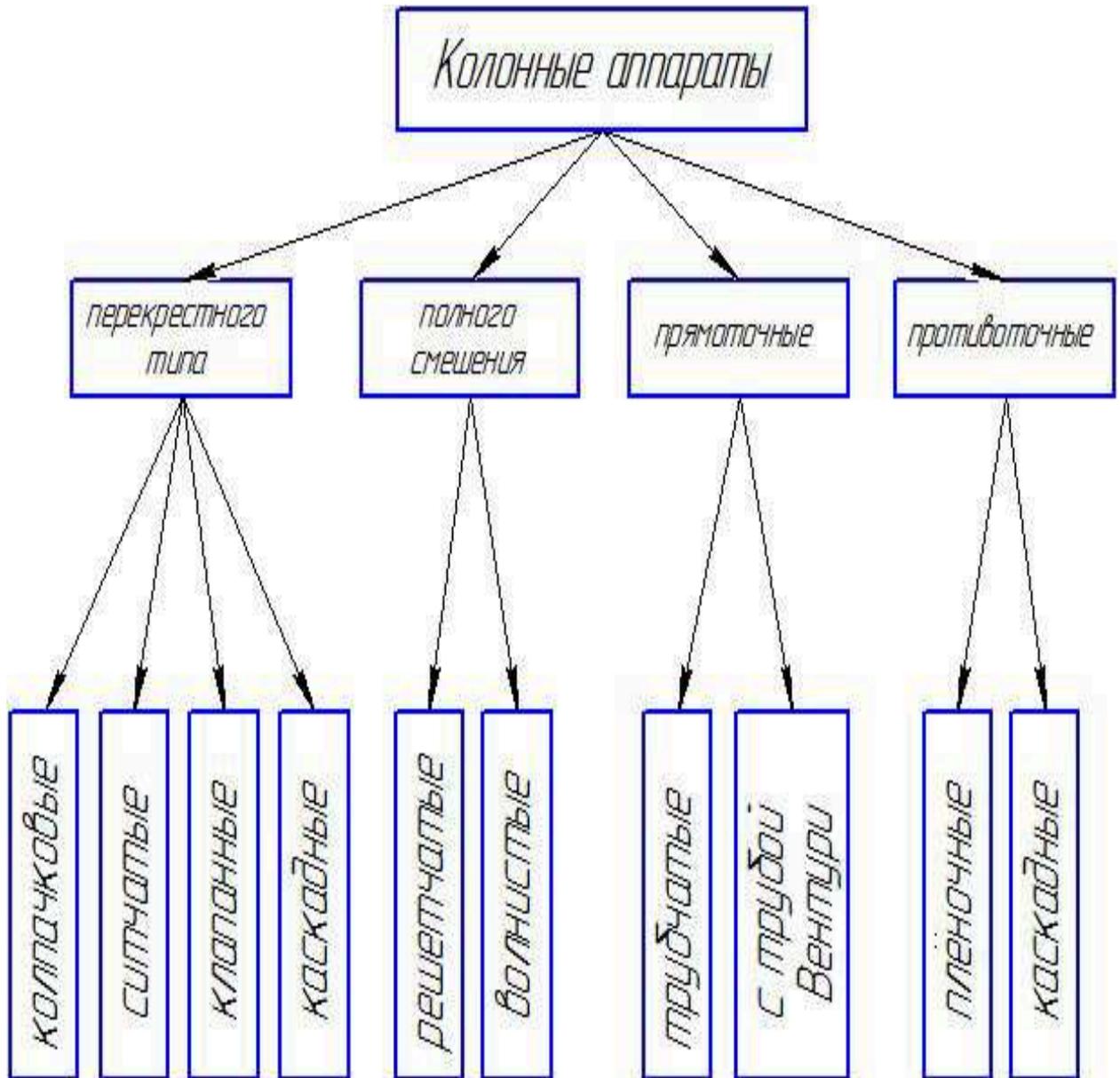


Рисунок 1.1 - Классификация контактных устройств по А. Г. Евстафьеву

В. В. Кафаров [2-5, 7, 8] положил в основу предложенной им классификации диффузионных аппаратов принцип образования межфазной поверхности в аппарате. Согласно этому принципу он разделяет диффузионные аппараты, к которым относятся абсорбционные и ректификационные аппараты, на три основные группы: с фиксированной поверхностью фазового контакта; с поверхностью контакта, образуемой в процессе движения потоков; с внешним подводом энергии.

Дальнейшее развитие этой классификации также основывается на конструктивных особенностях контактных устройств (рисунок 1.2).

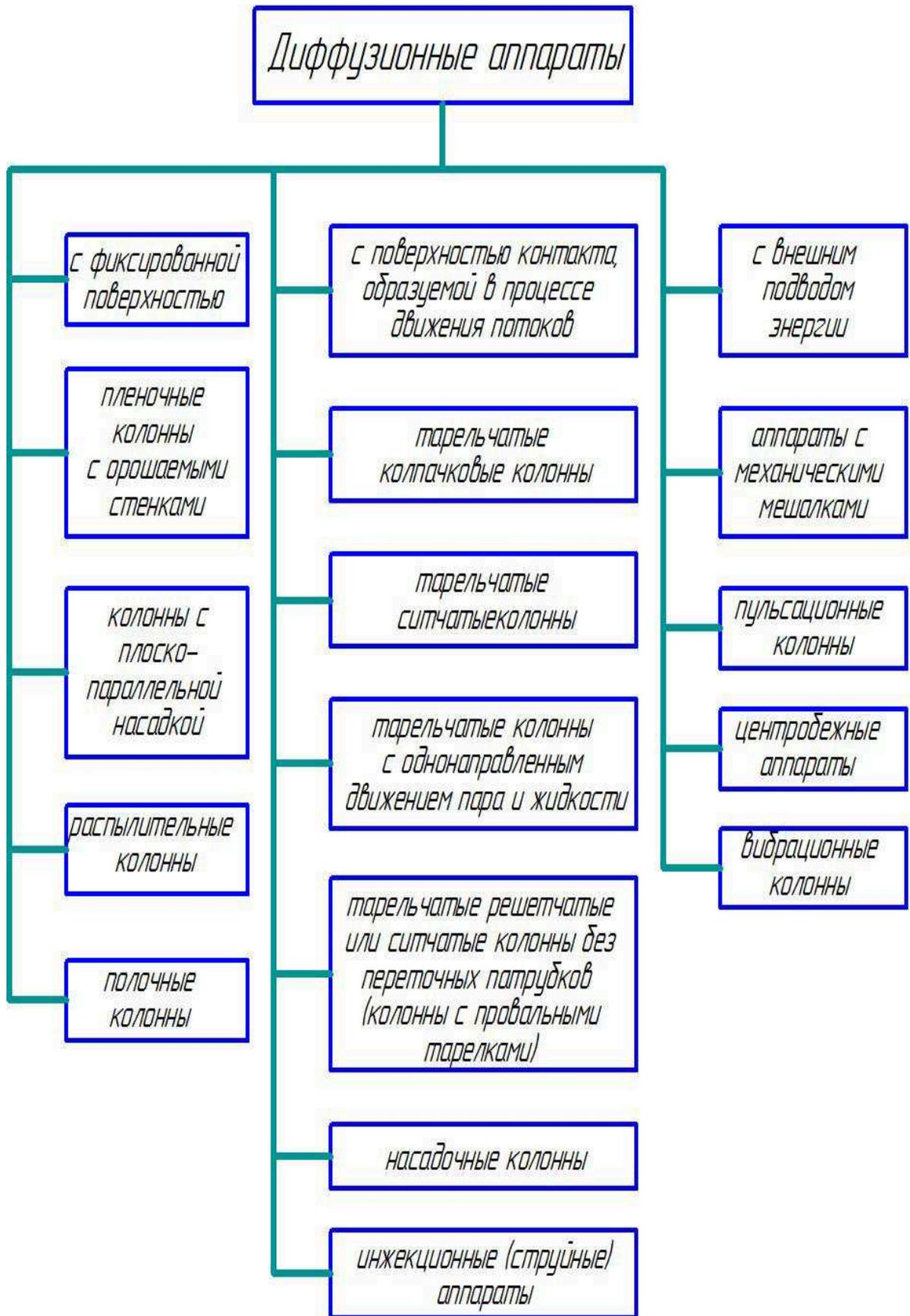


Рисунок 1.2 - Классификация диффузионных аппаратов по В. В. Кафарову

Эта схема также не лишена некоторых недостатков. В ней не учитывается взаимное направление потоков пара (газа) и жидкости. Из группы насадочных аппаратов выделены колонны с плоскопараллельной насадкой, которые являются разновидностью насадочных. Следует также отметить, что одно и то же контактное устройство может быть отнесено как к первой, так и ко второй группе в зависимости от гидродинамического режима работы аппарата. Поэтому, например, насадочные контактные устройства должны были бы быть показаны и в первой и во второй группах.

Наиболее подробно классифицированы контактные устройства Стабниковым В. Н. (рисунок 1.3, табл.1) [1, 14].

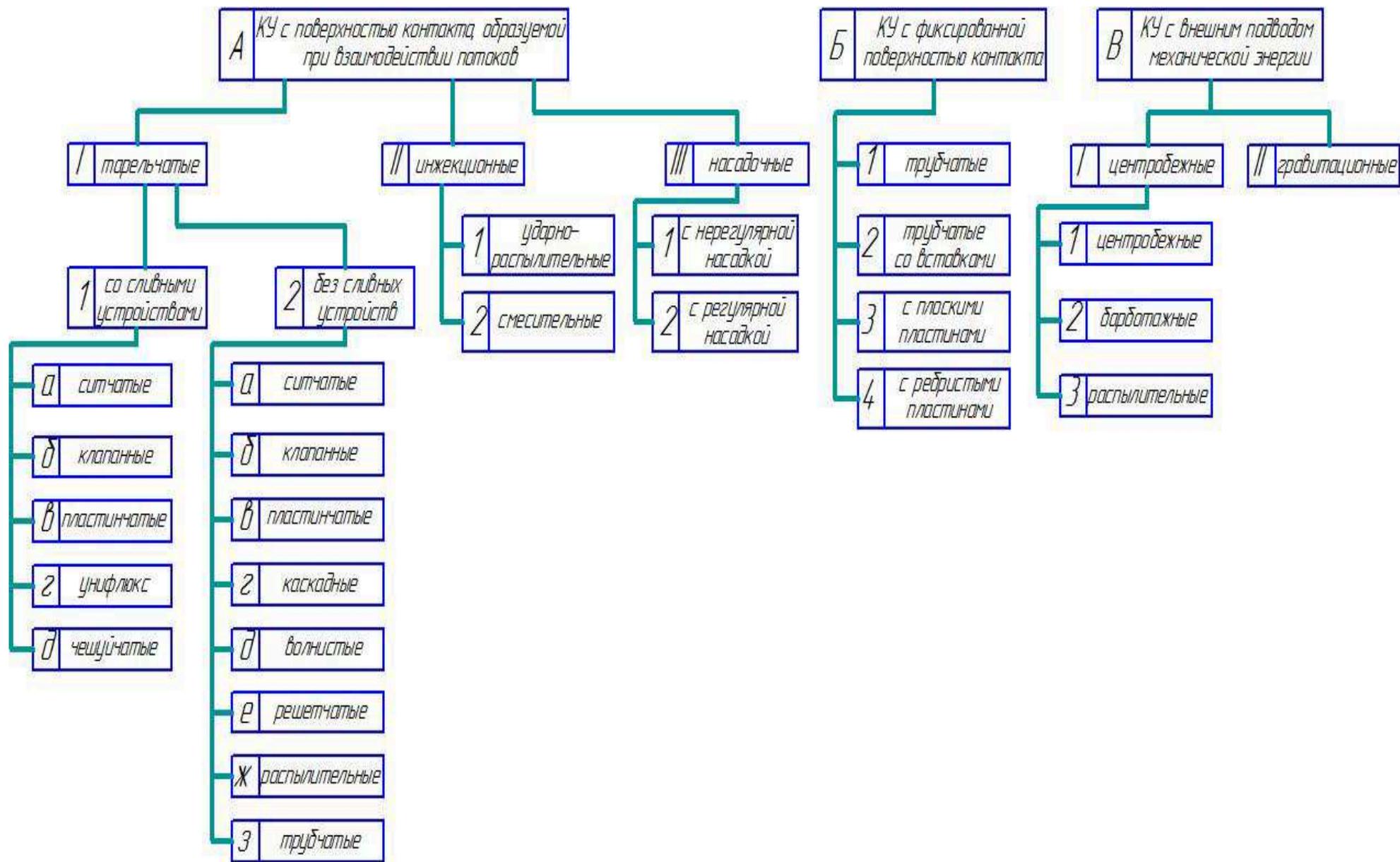


Рисунок 1.3 - Классификация контактных устройств (по Стабникову В. Н.)

Более полная классификация контактных устройств с указанием конструктивных особенностей приведена Стабниковым В. Н. в табл. 1 [1, 10]. Принадлежность же их к той или иной группе отмечается в соответствующих графах таблицы. Этот принцип классификации позволяет шире охватить существующие контактные устройства и полнее их охарактеризовать.

Более подробное описание объектов исследования приведено в таблице 1.1

Таблица 1.1 - Классификация контактных устройств

Группа	Тип контактного устройства	Взаимное направление потоков				Метод обработки контакта ¹⁴		
		Перекрестное	Полное смещение	Прямоточное	Противоточное	Фиксированная поверхность	В процессе движения потоков	С внешним подводом энергии
1	Тарельчатые контактные устройства							
	Со сливными устройствами							
	Колпачковые:							
	- одноколпачковые	+	-	-	-	-	+	-
	- двойного кипячения	+	-	-	-	-	+	-
	- многоколпачковые	+	-	-	-	-	+	-
	- тоннельные	+	-	-	-	-	+	-
	Ситчатые:							
	- плоские	+	-	-	-	-	+	-
	- волнистые	+	-	-	-	-	+	-
	Клапанные:							
	- с верхним ограничением подъема клапана	+	-	-	-	-	+	-
	- с нижним ограничением подъема клапана	+	-	-	-	-	+	-

Продолжение таблицы 1.1

Группа	Тип контактного устройства	Взаимное направление потоков				Метод образования контакта		
		Перекрестное	Полное смещение	Прямоточное	Противоточное	Фиксированная поверхность	В процессе движения потоков	С внешним подводом энергии
	Однонаправленные:	14						
	- Унифлюкс	-	-	+	-	-	+	-
	- чешуйчатые	-	-	+	-	-	+	-
	- пластинчатые	-	-	+	-	-	+	-
	Без сливных устройств (проваль- ные)							
	Ситчатые:							
	-плоские	-	-	-	+	-	+	-
	- волнистые	-	-	-	+	-	+	-
	Решетчатые	-	-	-	+	-	+	-
	Трубчатые	-	-	-	+	-	+	-
	Клапанные:							
	- с верхним ограничением подъема клапана	-	-	-	+	-	+	-
	- с нижним ограничением подъема клапана	-	-	-	+	-	+	-
2	Инжекторные контактные уст- ройства							
	Ударно-распылительные	-	-	+	-	-	+	-
	Смесительные	-	-	+	-	-	+	-

Продолжение таблицы 1.1

Группа	Тип контактного устройства	Взаимное направление потоков				Метод образования контакта		
		Перекрестное	Полное смещение	Прямоточное	Противоточное	Фиксированная поверхность	В процессе движения потоков	С внешним подводом энергии
3	Насадочные контактные устройства	14						
	С нерегулярной насадкой	-	-	-	+	+	+	-
	С регулярной насадкой:							
	- плоскопараллельные	-	-	-	+	+	+	-
	- зигзагообразные	-	-	-	+	+	+	-
4	Пленочные контактные устройства							
	Трубчатые:							
	- со вставками	-	-	-	+	+	-	-
	- без вставок	-	-	-	+	+	-	-
5	Распылительные контактные устройства	-	-	-	+	-	+	-
6	Контактные устройства с внешним подводом энергии							
	Гравитационные	-	+	-	-	-	-	+
	Центробежные:							
	- пленочные	+	-	-	-	-	-	+
	- барботажные	-	-	-	+	-	-	+
	- распылительные	-	+	-	-	-	-	+

Ранее предусматривалась отдельная классификация конструкций контактных устройств – по способам взаимодействия фаз и принципам образования межфазной поверхности. Для более полной классификации целесообразно воспользоваться обоими признаками одновременно, поскольку условия массообмена определяются способом взаимодействия потоков и состоянием межфазной поверхности. [16, 32]

Еще одна классификация контактных устройств была предложена Александровым И.А. (рисунок 1.4) [28]. Эта классификация наиболее точно позволяет определить потенциальную группу контактных устройств для исследования, а именно струйно-вихревые и пленочно-вихревые. Поскольку центробежные массообменные контактные устройства по своим характеристикам (высокая производительность и эффективность при минимальных габаритно массовых размерах) наиболее подходят для решения проблем снижения габаритно массовых характеристик нового оборудования или повышении производительности действующих массообменных аппаратов.[97, 99]

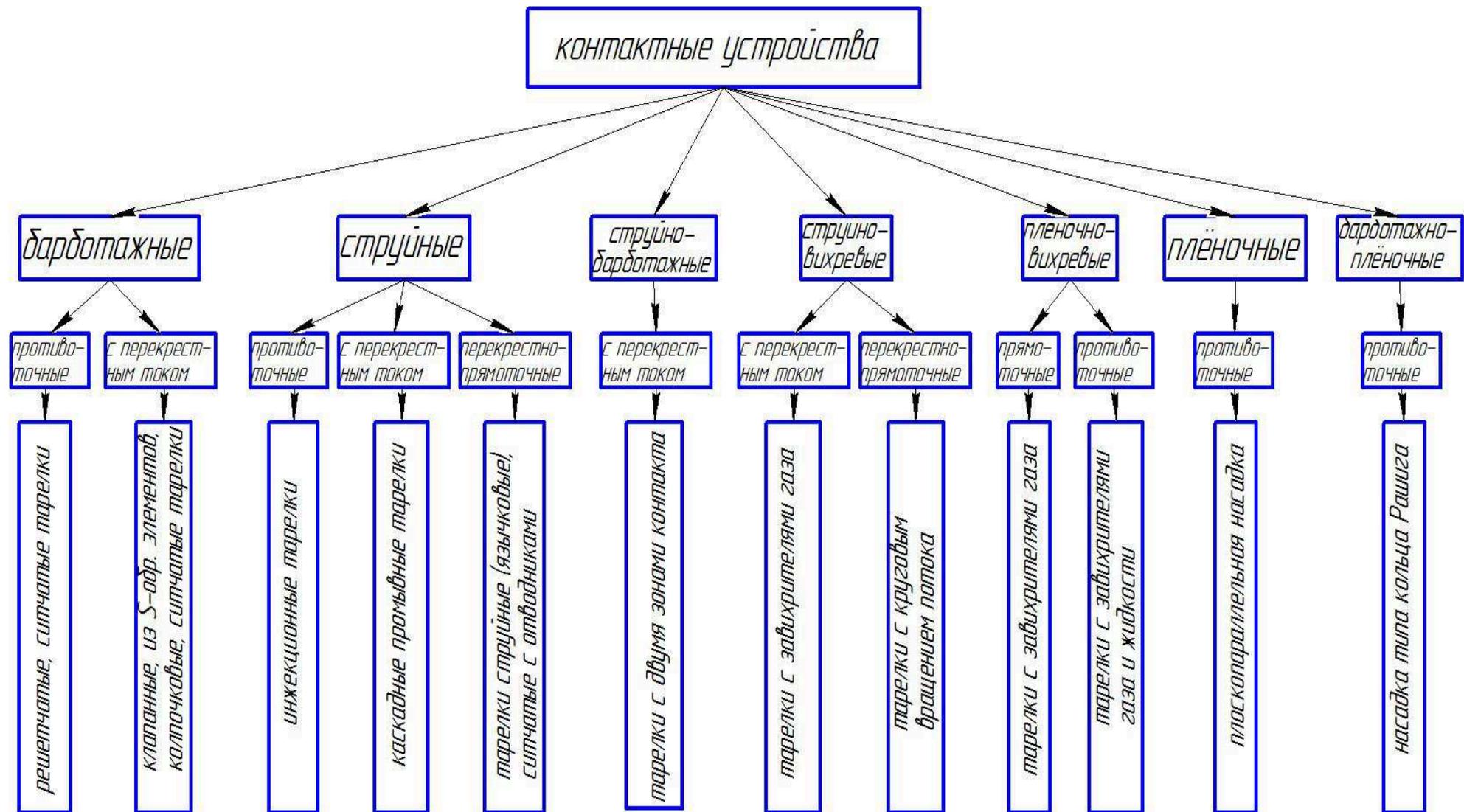
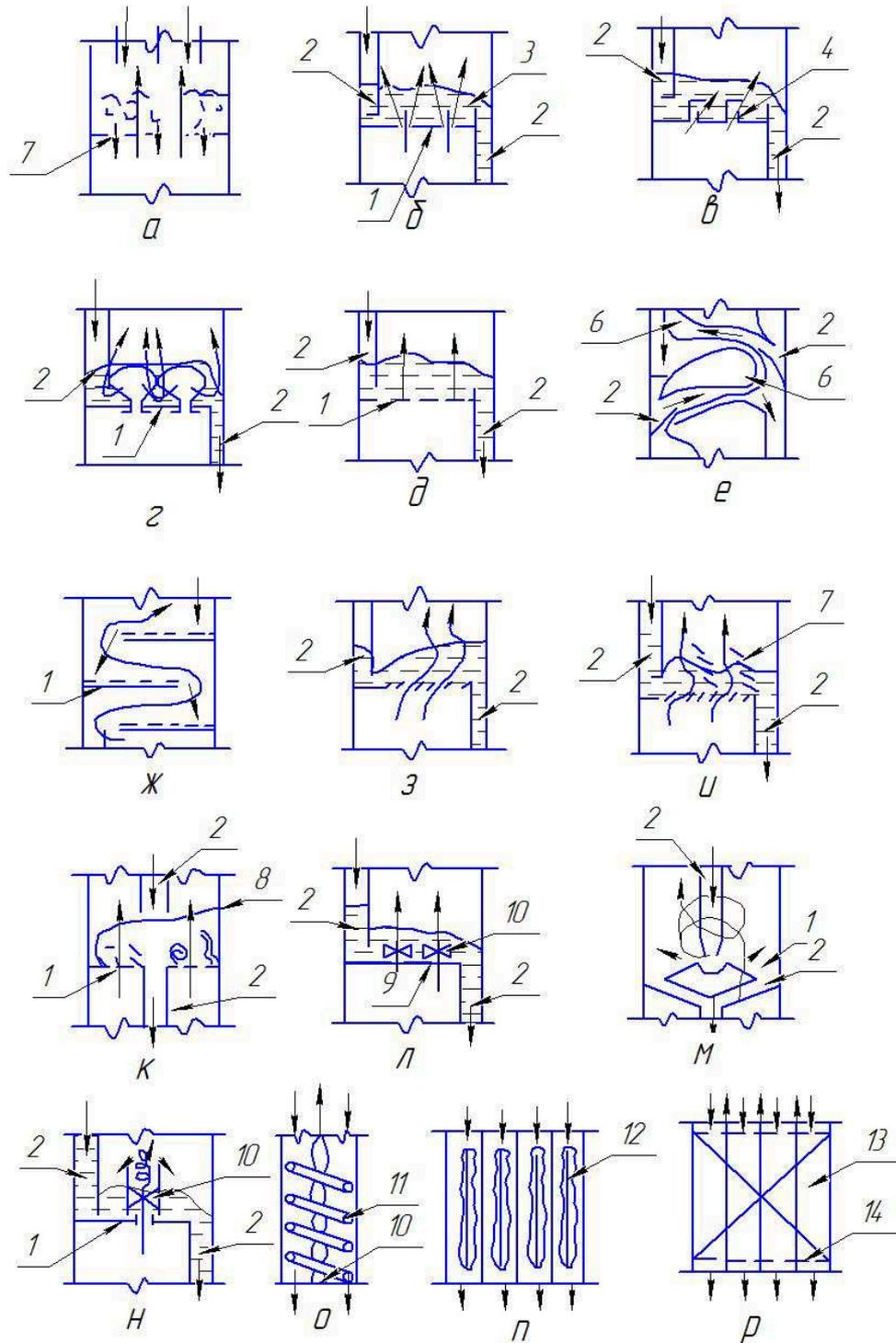


Рисунок 1.4 - Классификация контактных устройств ректификационных и абсорбционных аппаратов по Александру И.А.

1.2 Принципиальные схемы работы контактных устройств

На рисунке 1.5 приведена указанная классификация контактных устройств и показаны соответствующие конструкции контактных устройств со схемами взаимодействия фаз. Рассмотрим кратко особенности этих конструкций и условия их работы.



Тарелка: а — решетчатая (ситчатая) провальная, б — колпачковая, в — из S-образны элементов; г — клапанная, д — ситчатая, е — инъекционная, ж — каскадная промывная, з — струйная («язычковая»), и — ситчатая с отбойными элементами, к — ситчатая с двумя зонами контакта фаз, л — струйная с завихрителями газа, м — с регулярным вращением газо-жидкостного потока, н — прямоточное контактов устройство колонны, о — вихревая, п — с плоскопараллельной насадкой, р — насадочная; 1 — основание тарелки, 2 — переливы, 3 — колпачок, 4 — S-образный элемент; 5 — клапан, 6 — направляющее устройство, 7 — отбойное устройство, 8 — отражательная пластина, 9 — направляющий элемент, 10 — закручиватель потока газа, 11 — то же, жидкости, 12 — листовая насадка, 13 — слой насадки; 14 — опорная решетка; короткая стрелка — жидкость; длинная стрелка — газ.

Рисунок 1.5 - Конструкция контактных устройств со схемами взаимодействия газа в парах и жидкости

Решетчатые и ситчатые беспереливные (провальные) тарелки (рис. 1.5, а) имеют перекрывающее все сечение колонны основание 1, выполненное в виде листа со щелями или отверстиями соответственно, но у них нет специальных переливных устройств для стока жидкости. При нормальной работе на всей плоскости тарелки образуется устойчивый барботажный слой, при этом места стока жидкости распределяются более или менее равномерно по сечению колонны. Недостатком таких тарелок является их чувствительность к изменению расходов паровой и жидкой фаз. К преимуществам этих тарелок следует отнести простоту конструкции, малую металлоемкость, большую пропускную способность по жидкости и использование загрязненных жидкостей.

Тарелки колпачковые (рис. 1.5, б), имеют специальные переливы 2. [27,].

Тарелки с колпачками имеют относительно высокий КПД (0,75–0,8). Их можно использовать при нестабильных нагрузках по жидкости и пару. Гидравлическое сопротивление, зависящее от глубины погружения колпачка, не превышает 1 кПа.

К недостаткам этих тарелок следует, прежде всего, отнести значительную металлоемкость и трудоемкость изготовления.

Тарелки из S-образных элементов (рис. 1.5, в) [28, 1]. Эффективность или КПД составляет 0,6–0,8. Оптимальная нагрузка по газу для этой тарелки на 10–25 % меньше, чем для колпачковой. У тарелки из S-образных элементов более полно используется сечение колонны, чем у туннельных, и она обладает более высокой производительностью.

Тарелки клапанные (рис. 1.5, г). Клапанные тарелки широко применяют в нефтехимической промышленности, их изготавливают с дисковыми и прямоугольными клапанами. Работают тарелки в режиме прямого или перекрестного движения фаз. Для увеличения производительности и диапазона устойчивой работы клапанные тарелки выполняют балластными. Клапаны таких тарелок могут иметь индивидуальный и групповой балласт. При работе таких устройств вначале поднимается пластина клапана, затем она упирается в балласт и поднимается вместе с балластом. При малой производительности по газу тарелка работает как обычная с дисковым клапаном меньшей массы. Основные преимущества клапанных тарелок: способность обеспечить эффективный массообмен в большом интервале рабочих нагрузок, несложность конструкции, низкая металлоемкость и невысокая стоимость.

Тарелки ситчатые (рис. 1.5, д). Ситчатые тарелки представляют собой плоский перфорированный лист со сливными устройствами. Преимущество ситчатой тарелки: большое свободное сечение тарелки; высокая производительность по пару; простота изготовления; малая металлоемкость. Недостатки ситчатых тарелок: высокая чувствительность к точности установки; не рекомендуется использовать для работы с загрязненными средами, это вызывает забивание отверстий.

Для поступающей и уходящей жидкости и направляющие элементы для прохода газа: патрубки с колпачками, установленные на основании 1, S-образные элементы 4, установленные соответствующим образом один относительно другого, подвижные клапаны 5, установленные в отверстиях основания 1, и, наконец,

отверстия в основании 1. Работают эти тарелки следующим образом. Жидкость, поступающая через переливное устройство, распределяется равномерно по всей плоскости основания тарелки и затем сливается в другое переливное устройство. Газ проходит через направляющие элементы и барботирует через жидкость, образуя вспененный дисперсный слой газа в жидкости.

Инжекционная тарелка (рис. 1.5, е) имеет специальное переливное устройство 2 для поступающей и уходящей жидкости и направляющие элементы 6 для движения газо-жидкостного потока. Работает тарелка следующим образом. Жидкость из перелива инжeksiруется газом, дробится на струи и капли и транспортируется вдоль элемента 6. В конце элемента 6 большая часть жидкости выделяется из потока газа и поступает в нижерасположенное сливное устройство. Следовательно, в этом случае контакт газа и жидкости происходит в разреженной, дисперсной системе жидкости в газе. Недостатки: сложность изготовления, большое гидравлическое сопротивление. [1-5]

Каскадные промывные (полочные) тарелки (рис. 1.5, ж) состоят из основания 1 в виде сплошных листов (полок), перекрывающих большую часть сечения колонны с противоположной стороны у расположенных рядом контактных устройств. Жидкость стекает струями с основания одного контактного устройства на основание другого, а газ проходит между тарелками и пересекает стекающую жидкость.

Тарелка струйная (язычковая) (рис. 1.5, з) имеет в основании 1 направляющие элементы для прохода газа в виде прорезей или в форме язычка с отогнутой вверх вырезанной частью основания. Направляющие элементы обеспечивают однонаправленное движение газа и жидкости вдоль контактного устройства. Конструкция переливов 2 такая же, как и у рассмотренных ранее тарелок. При скорости газа до 1,5 м/с тарелки работают аналогично ситчатой и колпачковой: жидкость из переливного кармана поступает на рабочую часть тарелки, газ вводится через просечки, барботирует через слой жидкости, аэрирует ее и на тарелке образуется газожидкостный слой. При скорости газа более 1,5 м/с, газовые струи, выходящие из просечек, и создаваемые ими потоки жидкости движутся к вертикаль-

ным перегородкам или стенкам колонны, ударяются о них, сепарируются и газ покидает тарелку. При этом жидкость совершает сложное зигзагообразное движение от переливного к сливному карману.

Ситчатая тарелка с отбойными элементами (рис. 1.5, и) состоит из основания 1 и наклонно расположенных отбойников 7, выполненных из просечно-вытяжного листа. Отогнутые кромки листов в основании тарелки образуют острый угол, направленный по ходу движения жидкости. Отогнутые кромки просечно-вытяжных листов отбойников направлены вниз в сторону слива жидкости с тарелки и образуют острый угол с горизонтальной плоскостью тарелки; сливная планка на выходе жидкости не предусмотрена. Отогнутые кромки просечно-вытяжных листов основания тарелки обеспечивают однонаправленное движение газа и жидкости от одного отбойного устройства к другому, а отогнутые кромки отбойных устройств — сепарацию фаз непосредственно на отбойных устройствах.

Тарелка с двумя зонами контакта фаз (рис. 1.5, к) имеет основание 1 в виде листа с отверстиями, щелями, клапанами или другими устройствами и переливы для жидкости 2, расположенные один над другим. Переливы не доходят до основания нижележащей тарелки и имеют снизу отражательную пластину 8, которая обеспечивает струйное истечение жидкости в межтарельчатое пространство колонны; контакт газа и жидкости происходит сначала в барботажном слое газ — жидкость и затем в стекающих струях жидкости. [1, 2-5]

Тарелка с регулярным вращением газо-жидкостного потока (рис. 5, л) имеет завихритель для потока газа 10, выполненный из набора тангенциально расположенных пластин или листов с расположенными на них тангенциальными просечками. Тарелка имеет специальные переливные устройства 2; боковое устройство соединяется с расположенным ниже центральным устройством. [13, 18, 22]. Тарелка работает следующим образом. Газ, проходя через завихритель, смешивается с жидкостью и придает ей круговое, вращательное движение по тарелке. Контакт пара и жидкости происходит в высокодисперсном слое газ — жидкость, где основной фазой является газ, а дисперсной — жидкость.

В колонне с плоскопараллельной насадкой (рис. 1.5, п) по ходу движения газового потока на небольшом расстоянии друг относительно друга установлены плоские или определенным образом гофрированные листы. Жидкость стекает тонкой пленкой по поверхности листов, взаимодействуя с газом в противотоке.

Контактные устройства в насадочной колонне (рис. 1.5, р) выполняются в виде слоя беспорядочно или регулярно уложенных на опорной конструкции 14 элементов насадки. Контакт фаз в слое насадки осуществляется в противотоке газа и пленки жидкости на поверхности элементов насадки и в дисперсном слое жидкость — газ между отдельными элементами насадки.

Вихревая колонна (рис. 1.5, о) выполняется из одной или нескольких труб с установленными в них завихрителями потока газа 10 и жидкости 11. Газ движется по центру трубы в закрученном потоке навстречу стекающей по периферии трубы жидкости. Следовательно, контакт газа и жидкости осуществляется между закрученным потоком газа и закрученной пленкой жидкости.

Прямоточное контактное устройство (рис. 1.5, н) состоит из обычных переливов для жидкости 2, основания 1 в виде листа с установленными на нем контактными элементами в виде сопла, трубы и завихрителей для потока газа 10. Контакт фаз осуществляется здесь в прямотоке между пленкой жидкости и закрученным потоком газа. В остальном работа прямоточного контактного устройства мало чем отличается от работы рассмотренных ранее тарелок. [19-20, 34, 58]

Тарелка струйная с завихрителями для потока газа (рис. 1.5, л) имеет обычные переливные устройства 2 для жидкости, основание 1 в виде листа с установленными на нем направляющими элементами 9 и завихрителями потока газа 10 различной конструкции. Работа этих контактных устройств протекает таким же образом, как и у обычных барботажных тарелок, с тем лишь отличием, что контакт газа и жидкости осуществляется в закрученном вихревом потоке жидкость — газ, где основной фазой является жидкость, а дисперсной — газ. Главным составляющим таких тарелок является центробежное устройство, изучением которого и посвящена данная глава.

1.3 Требования, предъявляемые к контактными устройствам колонных аппаратов

В таблице 1.2. приведены основные относительные показатели различных тарелок по Александрову И. А., где в качестве эталона использовалась колпачковая тарелка и также представлена тарелка с центробежными элементами, разработки ОАО "НИПИгазпереработка".

Таблица 1.2 – Основные показатели контактных устройств

Тип тарелок	Относительная производительность	Относительная эффективность	Диапазон устойчивой работы	Величина гидравлического сопротивления, мм вод.ст.	Относительная стоимость тарелки	
					УС	НС
Колпачковая	1	1	2...3,5	70...100	1,0	1,4
С S-образными элементами	1...1,1	1...1,1	2...2,5	70...100	0,6	1,0
Клапанная	1,2...1,5	1...1,1	3...4	50...80	0,65	1,0
Ситчатая	1,2...1,4	1...1,1	2...3	30...40	0,6	1,0
Струйная	1,2	0,8	2...3	20...50	0,5	0,85
С центробежным массообменным элементом	2,0...2,5	1,1-1,3	2-2,5	110-130	1,1	1,4-1,5

Требования, предъявляемые к контактными устройствам колонных аппаратов установок подготовки газа весьма разнообразны.[83] Они зависят от условий производства, требований к качеству получаемых продуктов, типа аппаратов (колонны ГФУ, абсорберы, десорберы и т.п.). Тем не менее всегда контактные устройства должны обеспечивать возможность поддержания нормального технологического режима в широком диапазоне изменения нагрузок, так как на установ-

ках подготовки газа наблюдаются значительные колебания количества и качества перерабатываемого сырья.[12]

При оценке конструкций тарелок обычно опираются на следующие показатели:

- а) производительность;
- б) гидравлическое сопротивление;
- в) эффективность при рабочих нагрузках;
- г) диапазон рабочих нагрузок в условиях высокой эффективности;
- д) сопротивление одной теоретической тарелки при рабочих нагрузках;
- е) возможность работы на средах, склонных к образованию инкрустаций, к полимеризации;
- ж) простоту конструкции, проявляющуюся в трудоемкости изготовления, монтажа, ремонтов.

При выборе тарелок для их оценки достаточно иметь данные по показателям а), в) и г), если они различаются сравнительно слабо, то далее анализируют показатели е), ж), и з). [1-5]

Для интенсификации технологических процессов различных установок (при проведении реконструкций и т.п.) необходимо не только повышение эффективности разделения, но и повышение производительности существующих колонных аппаратах. Поэтому современные контактные устройства должны позволять получать и максимальную эффективность, и максимальную производительность в процессах ректификации и абсорбции. [56, 61, 72, 97]

Разрабатываемое автором контактное устройство центробежной массообменной тарелки надежно и эффективно будет работать при повышенных нагрузках по газовой (паровой) фазе в широком интервале нагрузок по жидкости, что позволит существенно снизить размеры проектируемых аппаратов, либо повысить производительность существующего оборудования, при проведении реконструкции. Хотя тарелка и обладает относительно высоким гидравлическим сопротивлением, что в некоторых процессах является ограничением области ее применения, но учитывая высокую производительность по газу (пару) ее можно рекомен-

довать к применению при соотношении жидкости к пару в диапазоне 0,02...0,6. Конкретные области применения для данного типа тарелок это в первую очередь абсорбера осушки [44] и очистки газа, скрубберы, абсорберы МАУ, укрепляющие секции абсорберов НТА и НТК.

1.4 Области применения центробежных контактных устройств

Конкретные области применения данного типа тарелок это в первую очередь абсорберы осушки и очистки природного и попутного нефтяного газа, скрубберы. Массообменом в центробежном поле занимаются многие фирмы, применительно к условиям нефтегазодобычи [21] и переработки известны работы фирм «Зульцер» и «ЦКБН». Эти фирмы объединили процесс массообмена в типовой тарелке (например, ситчатой) с последующим процессом сепарации в центробежном каплеотбойнике. Ниже приводятся конструкции тарелок указанных фирм. Комбинация массообменных тарелок и центробежных сепарационных элементов представлена в тарелке ShellConSep (рис. 1.6). [6, 77]

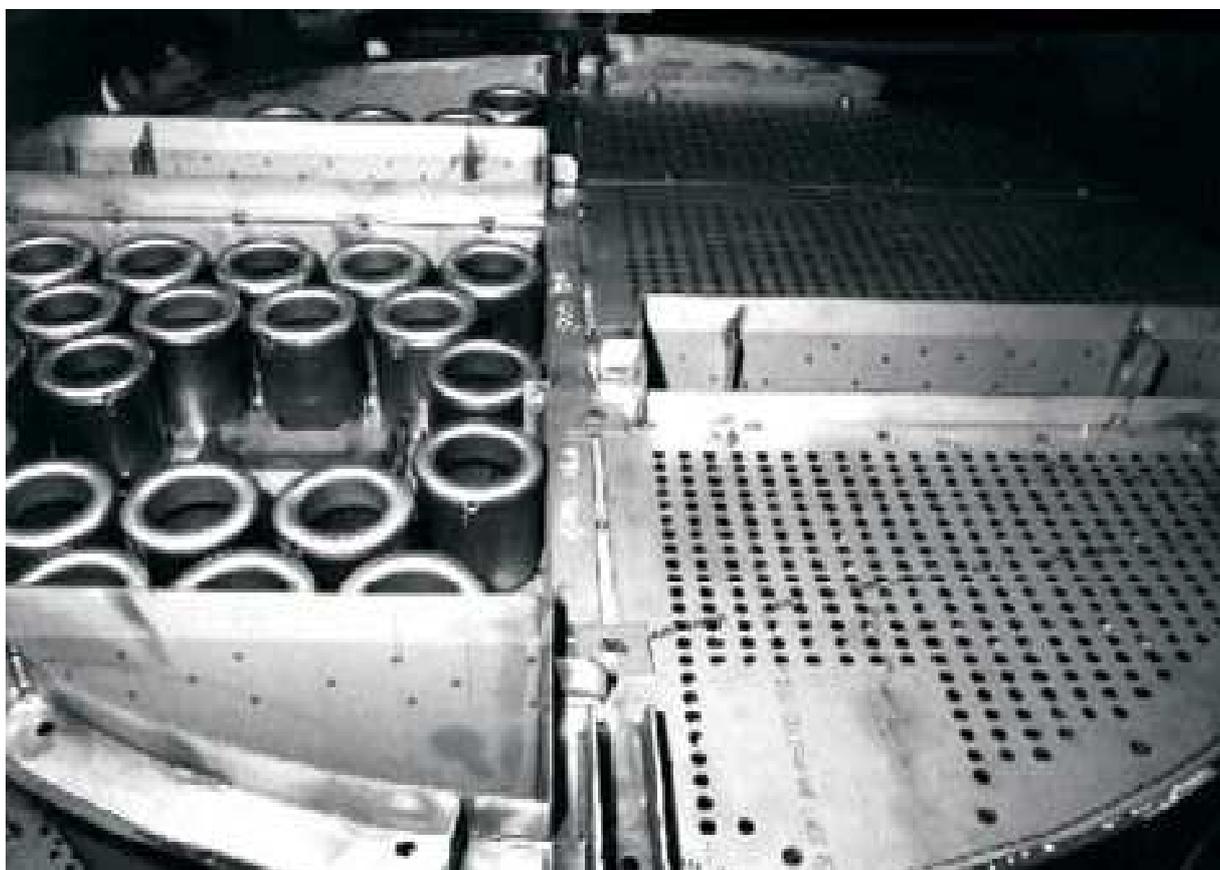


Рисунок 1.6 - Тарелка с вихревыми элементами ShellConSep.

Производительность этих тарелок может быть на 80% выше по сравнению с традиционными тарелками и на 50% больше, чем у других высокопроизводительных тарелок, при сохранении высокой массообменной эффективности.

Сепарация газа и жидкости на тарелке происходит за счет применения вихревых потоков. Благодаря центробежному эффекту разделения удается заметно преодолеть ограничения, характерные для устройств с гравитационным разделением фаз. Полотно тарелки может быть выполнено как у ситчатой или клапанной тарелки с различными видами клапанов. [53, 73]

Принципиальная схема действия такой тарелки описана на рисунке 1.7.

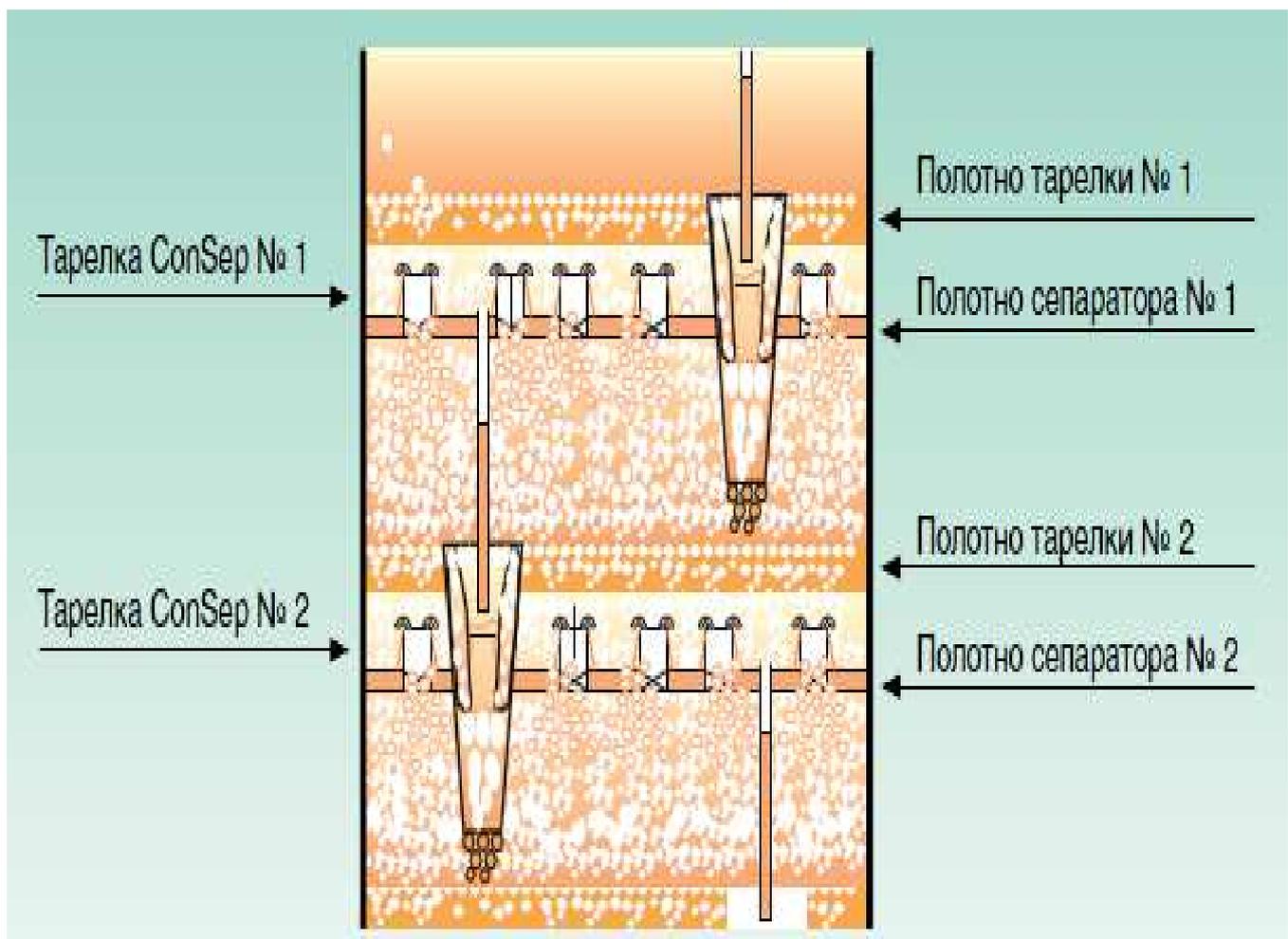


Рисунок 1.7 - Принципиальная схема действия тарелки ShellConSep.

Жидкость уносится с полотна тарелки потоком пара и в режиме прямого тока попадает на центробежные элементы, находящиеся под полотном вышерасположенной тарелки. В центробежном элементе происходит сепарация жидкости и па-

ра, после чего отсепарированная жидкость по трубе стекает в переливную камеру и через нее – на полотно тарелки, расположенной ниже той, с которой эта жидкость была ранее унесена. Отсепарированный газ устремляется под вышележащую тарелку, проходит через ее полотно, взаимодействуя с находящейся там жидкостью, и затем уносит эту жидкость в вихревые элементы вышележащей тарелки. Такая организация потоков на тарелке позволяет достигать очень больших скоростей пара в колонне. Однако данная конструкция требует поддержания постоянного уровня жидкости на тарелке.

Испытания тарелок ConSep проводились в колонне диаметром 1,22 метра на системе изо-бутан/н-бутан при давлении 11 бар. [67] (рисунок 1.8)

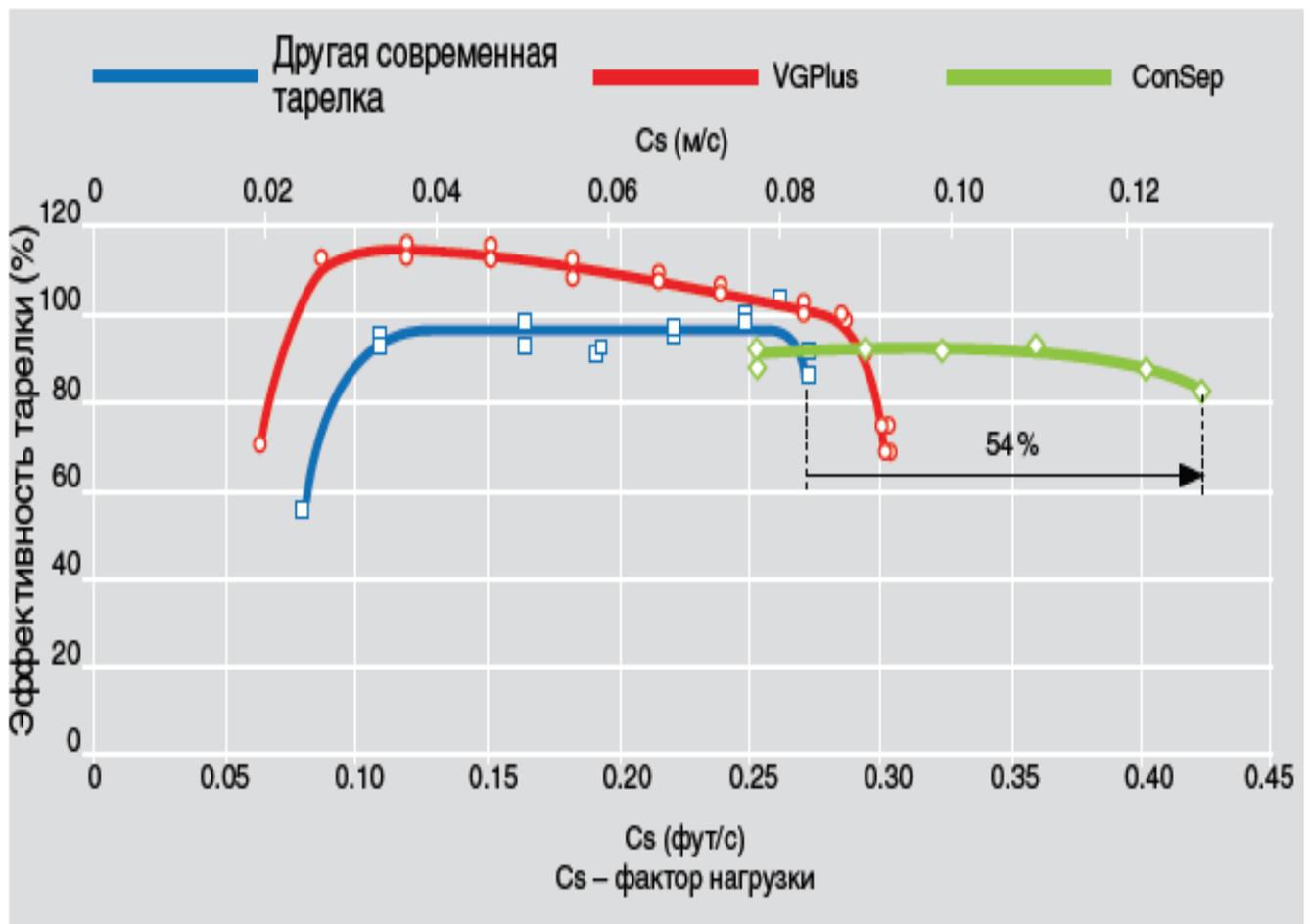


Рисунок 1.8 - Тесты института FRI по применению тарелки ConSep в колоннах высокого давления

Была использована конструкция двухпоточной тарелки ConSep с ситчатым полотном. По результатам испытаний оказалось, что производительность тарелки

ConSep более чем на 50% превышает другие испытанные высокопроизводительные тарелки, а эффективность тарелки достигает 90%.

Тарелки ShellConSep могут надежно использоваться в нефтеперерабатывающей, нефтехимической промышленности и на морских платформах.

Типичными областями применения этих тарелок являются колонны деэтанзации, депропанзации, дебутанизации, основные фракционирующие колонны, секции циркуляционного орошения, колонны разделения этанэтиленовой и пропан-пропиленовой фракций, а также задачи, в которых необходимо заметно повысить предельную производительность колонны.[23, 24, 33]

Тарелка ConSep успешно применяется для систем с соотношением нагрузок по паровой и жидкой фазам, близким к единице, и в частности в таких колоннах, как дебутанизаторы и основные фракционирующие колонны.

Примером их применения может быть сепаратор ЦКБН (Рис. 1.9) [31]

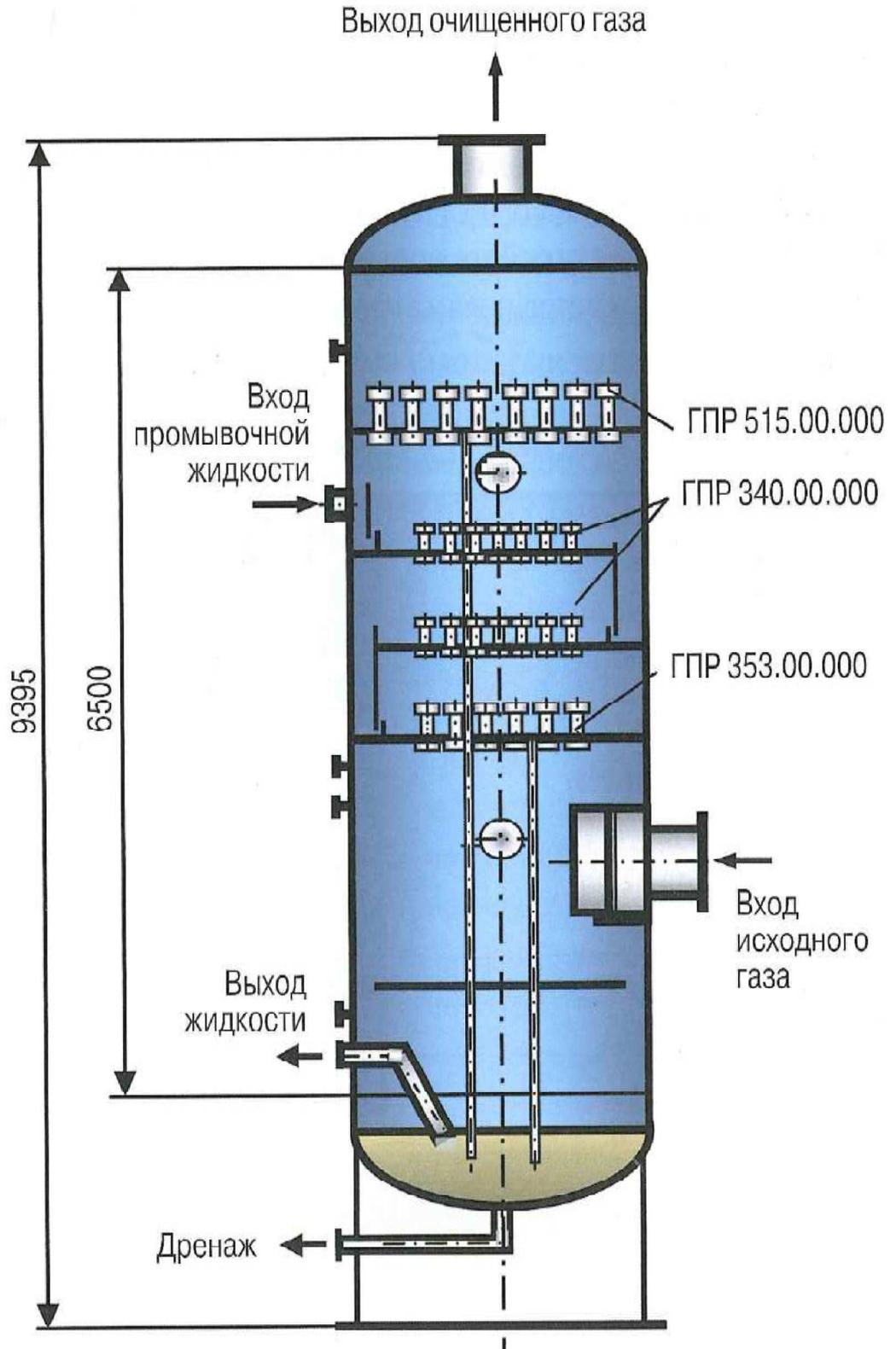


Рисунок 1.9 - Сепаратор газа ЦКБН.

Элементы, используемые для сепарации газа РД 0352106-87 «Проточные центробежные элементы, ЦКБН, Подольск, 1987» в данном сепараторе представлены на рисунке 1.10. [94]

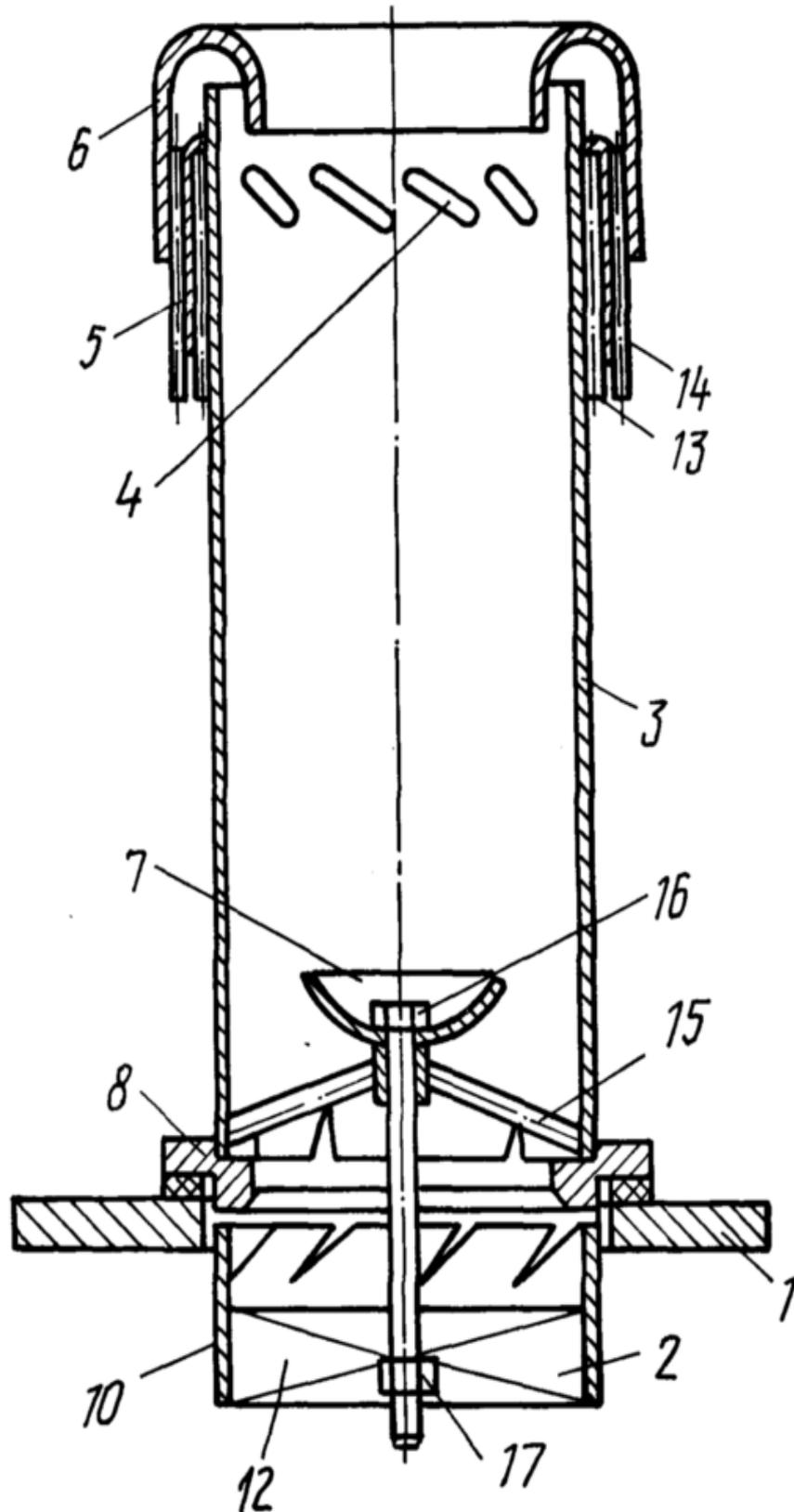


Рисунок 1.10 - Центробежный сепарационный элемент ЦКБН.

Устройство состоит из основания 1 и коаксиально установленных завихрителя 2, стакана 3 с отверстиями для первичной сепарации жидкости 4, расположенными в его верхней части и соединенными с карманом 5 для отвода жидкости, пленкосъемника 6, обтекателя 7, диафрагмы 8, расположенной между завихрителем 2 и стаканом 3, внутри устройства, и тангенциальных каналов для подачи жидкости, выполненных в виде отбортованных отверстий 9, с размерами отбортовок, не превышающими ширину кольца диафрагмы, в нижней части стакана 3 над диафрагмой 8. Завихритель 2 состоит из корпуса 10, в верхней части которого выполнены тангенциальные каналы для подачи газа в виде отбортованных отверстий 11. Внутри корпуса 10 расположены осевые лопатки 12. Отверстия 9 тангенциальных каналов для подачи жидкости отбортованы в ту же сторону, как и отверстия 11 тангенциальных каналов для подачи газа, и симметричны им относительно основания 1. Карман 5 соосно зафиксирован со стаканом 3 дистанционными прутками 13, а каплесьемник 6 дистанционными прутками 14.

Обтекатель 7 соосно зафиксирован со стаканом распорками 15, корпус завихрителя 10 соосно установлен в отверстии основания 1 и закреплен на нем.

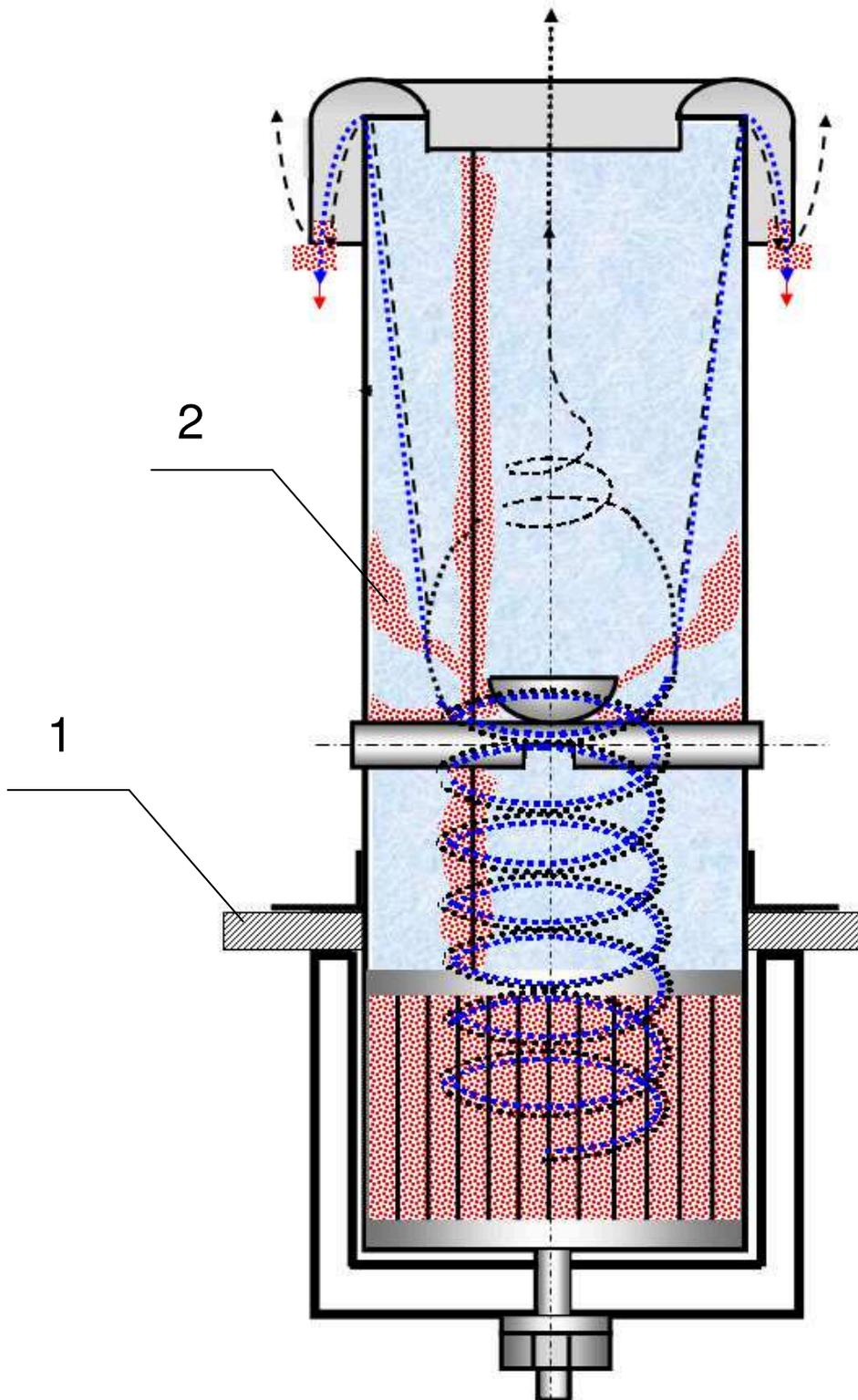
Стакан 3 соосно установлен в диафрагме 8 и жестко закреплен в ней. Стакан 3 и завихритель 2 соединены резьбовым соединением, состоящим, например, из болта 16 и гайки 17, соединенной с осевыми лопатками 12.

Данный элемент имеет ряд недостатков, таких как:

1. Для подачи сырья через трубку необходимо следить за постоянным уровнем жидкости на тарелке.
2. Распорки 15, установленные в корпусе элемента является сопротивлением центробежному вращению газа.
3. Распорки 15 нарушают структуру центробежного поля

В нефтяной и газовой промышленности со второй половины прошлого века серийно выпускаются центробежные газосепараторы оснащенные каплеотбойниками с прямоточными центробежными сепарационными элементами с тангенциальным завихрителем, чертеж ГПР 353 .00.000 (рисунок 1.11). [86, 89]Элемент работает с рециркуляцией 5% потока от расхода газа через завихритель[35]. Узел

подачи газа рециркуляции в ЦЭ представляет собой патрубок с отверстием снизу напротив завихрителя и установленный в поперечном сечении обечайки по ее диаметру. Сверху патрубка соосно с обечайкой установлен вытеснитель. Следует отметить, что патрубок, установленный в поперечном сечении, негативно влияет на формирование центробежного поля, генерируя струйные течения и вихреобразование. Унос жидкости с газом из центробежного каплеотбойника не превышает 15 мг/м^3 .



1 – тарелка; 2 - прямоточный центробежный элемент ГПР 353

Рисунок 1.11 –Тарелка с прямоточными центробежными элементами ГПР

353

Конструктивные факторы ЦЭ, их взаимное расположение оптимизированы в стендовых и промышленных условиях и на время внедрения разработки центро-

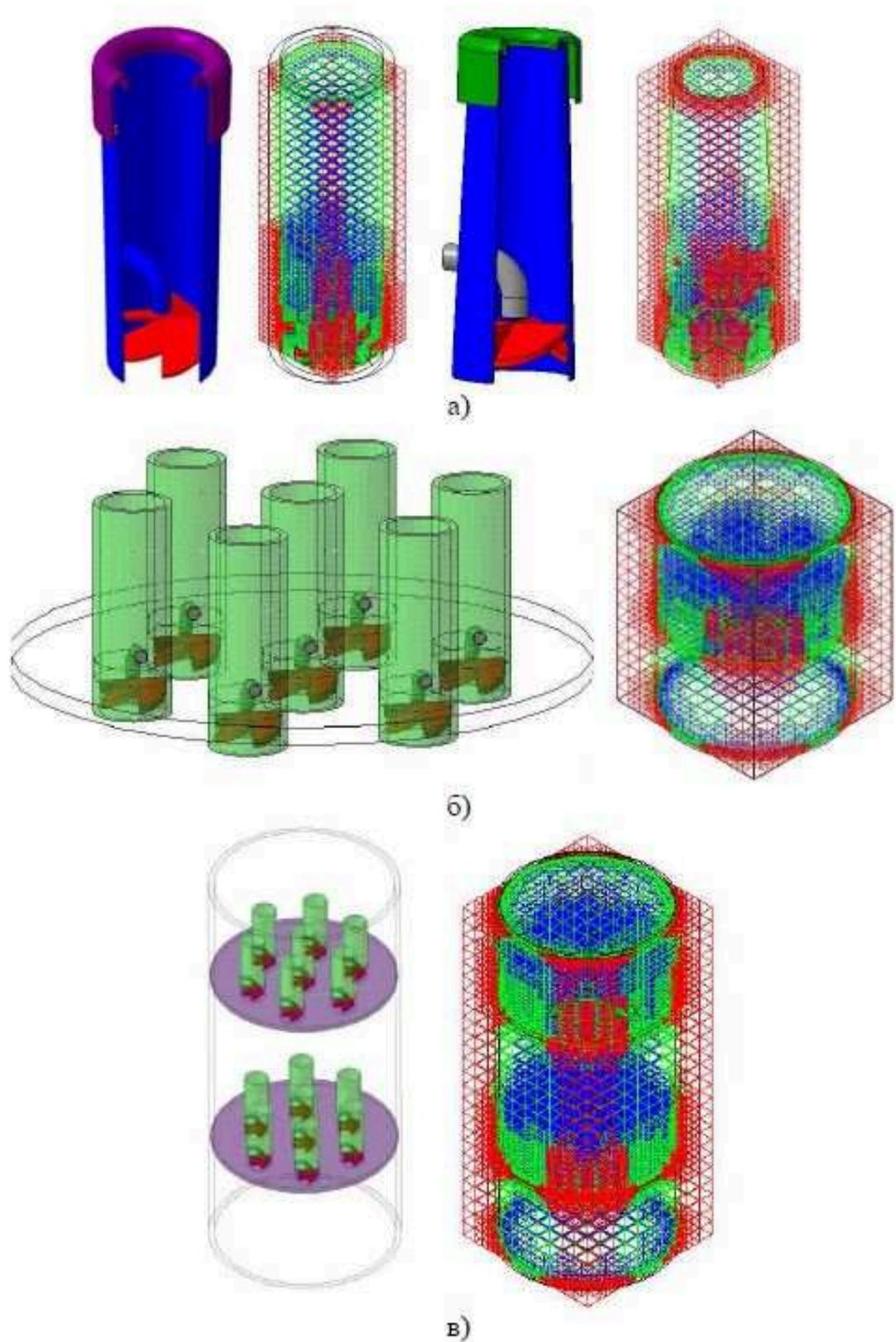
бежный элемент по эффективности не уступал лучшим зарубежным образцам. Однако, современное оборудование (компрессорное и, тепломассообменное: многопоточные, пластинчатые и витые теплообменники, массообменные тарелки) требует более тонкой очистки газа. За годы исследований модернизация этих элементов так и не решила основную их проблему с разрывом потока. [98, 100] Модернизация была направлена, в основном, на совершенствование гидродинамики элемента и устранение вторичного уноса аэрозолей с газом.

Причины вторичного уноса:

- Накапливание аэрозолей в приосевой зоне за счет отскока от внутренней поверхности обечайки или пленки осевшей на ней жидкости;
- Бомбардировка каплями пленку осевшей жидкости и выбивание из нее мелких частиц в приосевую зону;
- Осаждение аэрозолей на внешнюю поверхность вытеснителя с последующим перетеканием в приосевую зону;
- Унос аэрозолей из межэлементной зоны каплеотбойника с газом поступающим в нее с жидкостью через бковой канал пленкосъемника.

Подобные элементы так же изучались в Суамском государственном университете Украины.

Для определения характерных гидродинамических режимов работы изучаемых контактных ступеней в зависимости от конструктивных особенностей самого элемента (конструкции завихрителя, плёнкосъёмника, трубки для подачи жидкости) работники СГУ Украины провели компьютерное моделирование, включающее создание трёхмерных моделей и прямоугольной локальной сетки для прямо-точно-центробежного элемента с патрубками различной формы (рис. 1.12, а), контактной ступени (рис. 1.12, б) и двух соседних контактных ступеней (рис. 1.12, в).



а) прямоточно-центробежный элемент с патрубками различной формы;

б) контактная ступень; в) две соседние контактные ступени

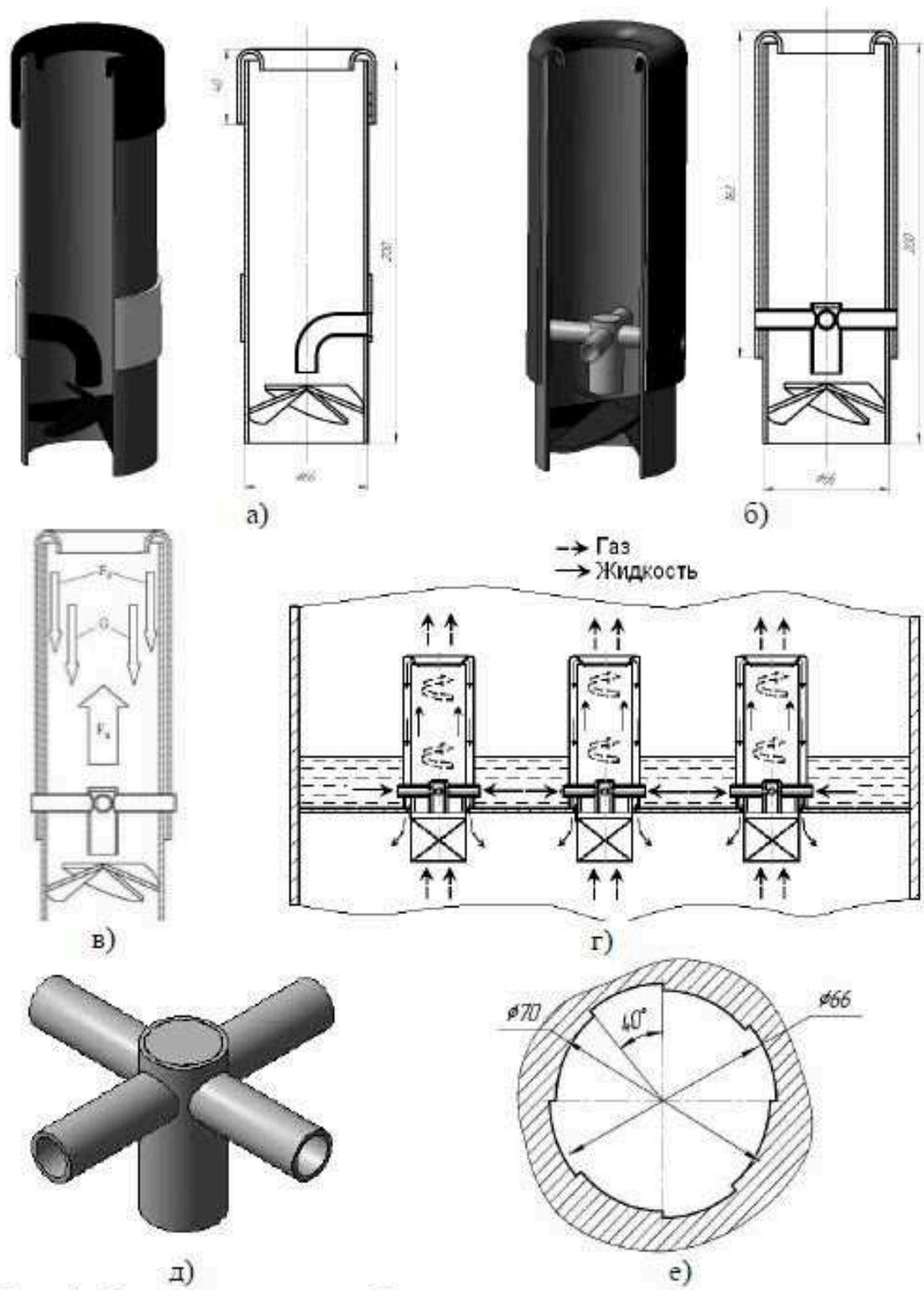
Рисунок 1.12 - Трёхмерные модели и прямоугольные локальные сетки для изучаемых объектов:

Совместный анализ результатов экспериментальных исследований и компьютерного моделирования [94, 96] позволил сделать такие выводы относительно усовершенствования основных конструктивных параметров контактного устройства и предложить новую конструкцию контактной ступени [78] (рис. 1.13,а,б, г):

- оптимальной конструкцией прямоточно-центробежного элемента следует считать цилиндрический патрубок, в нижней части которого располагается завихритель, состоящий из четырех завихрительных элементов, размещенных под углом 30° к горизонтальной плоскости;

- от внешней части патрубка плёнкосъёмник продолжается к полотну контактной ступени, в которой в зазоре между патрубком и плёнкосъёмником выполняются четыре сегментных отверстия для слива жидкости с углом раскрытия 40° (рис. 1.13, е); жидкость в патрубок подается из четырех сторон с помощью трубки для подачи жидкости (рис 1.13., д);

- высота прямоточно-центробежного элемента базируется на балансе трёх сил, что действующих на газожидкостный поток: силы трения F_t , силы притяжения G и аэродинамической силы F_a (рис. 1.13, в). Если сумма сил притяжения и трения больше аэродинамической силы, то в контактном патрубке создается гидродинамическая ситуация, при которой процесс разделения газожидкостной смеси является затруднительным, эффективность такого режима минимальна. Если же сумма сил притяжения и трения будет меньше аэродинамической силы, то будет наблюдаться значительный каплеунос.



а) существующая конструкция прямоточно-центробежного элемента; б) усовершенствованная конструкция прямоточно-центробежного элемента; в) план сил, действующих на газожидкостный поток; г) движение потоков в пределах контактной ступени; д) узел подвода жидкости к прямоточно-центробежному элементу; е) узел отвода жидкости из прямоточно-центробежного элемента

Рисунок 1.13 – Конструктивные особенности изучаемой контактной ступени:

Устройство работает таким образом. Газовый поток двигается снизу вверх колонны и поступает к каждому из прямоточно-центробежных элементов контактного устройства. При прохождении устройства для завихрения газовый поток закручивается и за счёт разрежения, возникающего в центральной части закрученного потока, из полотна тарелки через устройство для подвода жидкости происходит всасывание жидкости в патрубок прямоточно-центробежного элемента. Газ диспергирует и турбулизирует жидкость, струи жидкости перемешиваются с закрученным газом и поднимаются вверх, вращаясь на стенках патрубка контактного элемента. Толщина вращающегося слоя жидкости зависит от совокупности гидродинамических и конструктивных параметров вихревого контактного устройства.[17] Активное обновление поверхности происходит как в результате интенсивного перемешивания слоя жидкости по толщине, так и в результате непрерывной бомбардировки оторвавшихся капель жидкости о поверхность вращающегося жидкостного слоя. При поступлении к верхнему сечению прямоточно-центробежного элемента газ отделяется от жидкости и выходит через центральное отверстие патрубка, а жидкость отбрасывается к стенкам патрубка и, поднимаясь вверх, выходит из патрубка через устройство для отвода жидкости в полотне тарелки в зазор между цилиндрическим патрубком и плёнкосъёмником.[15]

Основными преимуществами предложенной конструкции массообменно-сепарационной тарелки с прямоточно-центробежными элементами являются:

- выравнивание значения средней движущей силы по рядам прямоточно-центробежных элементов на полотне тарелки за счет создания противоточного движения сплошной и дисперсной фаз и направленного отвода жидкости на расположенную ниже тарелку;

- уменьшение каплеуноса с контактной ступени за счет равномерного поступления жидкости в прямоточный центробежный элемент, распределения жидкости за счет действия центробежных сил и усовершенствованной конструкции плёнко-съемника;

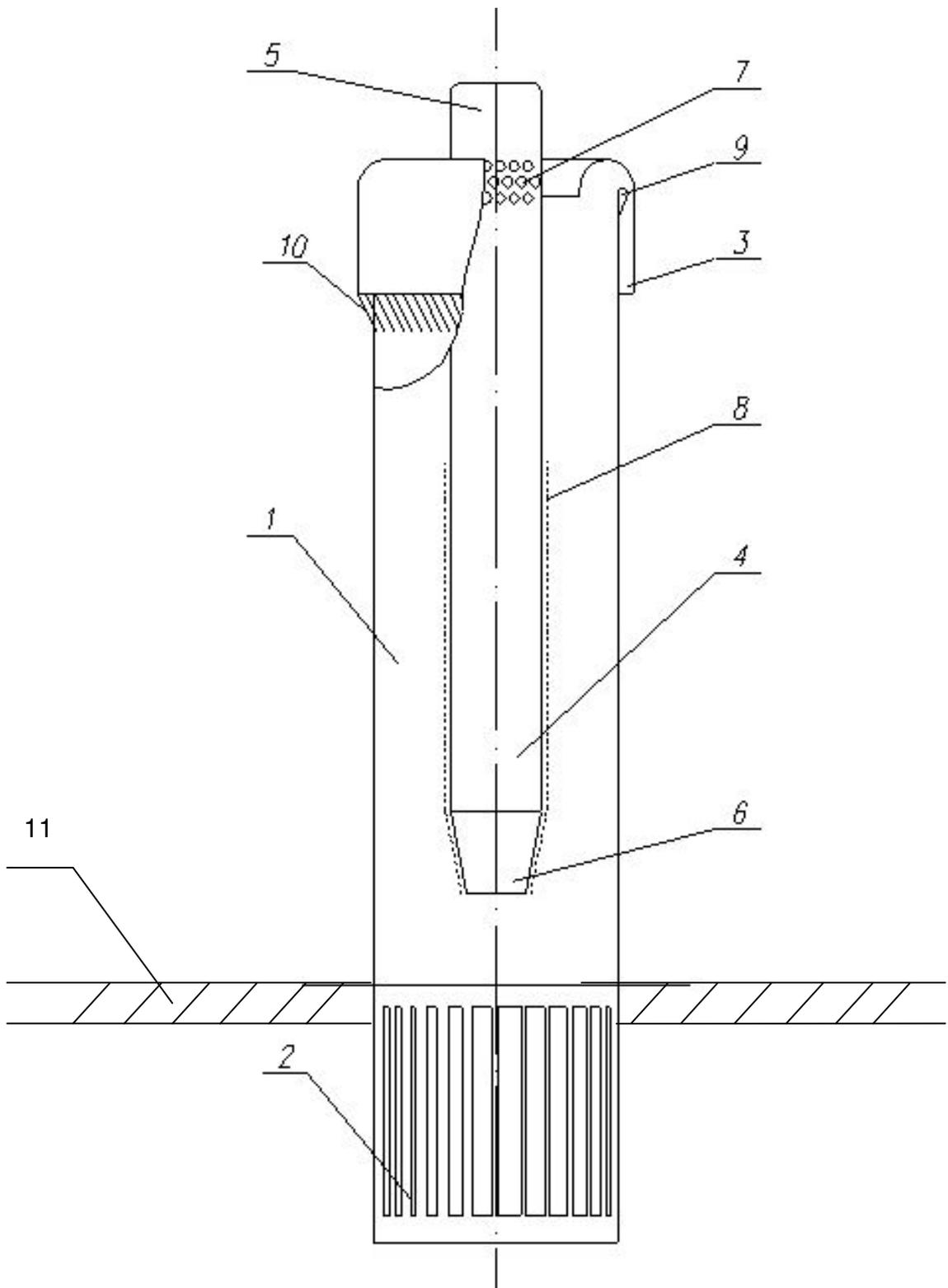
- увеличение поверхности массообмена за счет заполнения приемной и переливной секций контактными элементами в результате изменения характера движения сплошной и дисперсной фаз в пределах колонного аппарата;

- уменьшение высоты слоя жидкости на полотне за счет того, что процесс массообмена проходит не на полотне тарелки, а непосредственно в пределах прямоточно-центробежного контактного элемента;

- уменьшение гидравлического сопротивления контактной ступени в результате уменьшения составляющей сопротивления, которая обусловлена высотой слоя жидкости на тарелке.

Однако в СГУ Украины не смогли решить главную проблему тарелок с установленными данными элементами, а именно наличие центральной поперечной трубки внутри центробежного элемента, которая является причиной дробления потока во время его закрутки, что увеличивает унос газожидкостной смеси и уменьшает эффективность центробежного массообменного устройства.

Данные недостатки отсутствуют в тарелке с центробежным сепарационным элементом ОАО "НИПИгазпереработка", патент № 2140317 (рисунок 1.14)



1 - Обечайка; 2 - тангенциальный завихритель; 3 – пленкосъемник; 4- вытеснитель; 5- заглушка; 6 – сопло; 7- перфорация; 8- плоская металлическая сетка; 9 – овал; 10 – направляющие экраны; 11 – полотно тарелки

Рисунок 1.14–Тарелка с центробежным сепарационным элементом с направляющими

Представленный на рисунке 1.15 ЦЭ ГПР 353 в процессе создания претерпел ряд изменений.

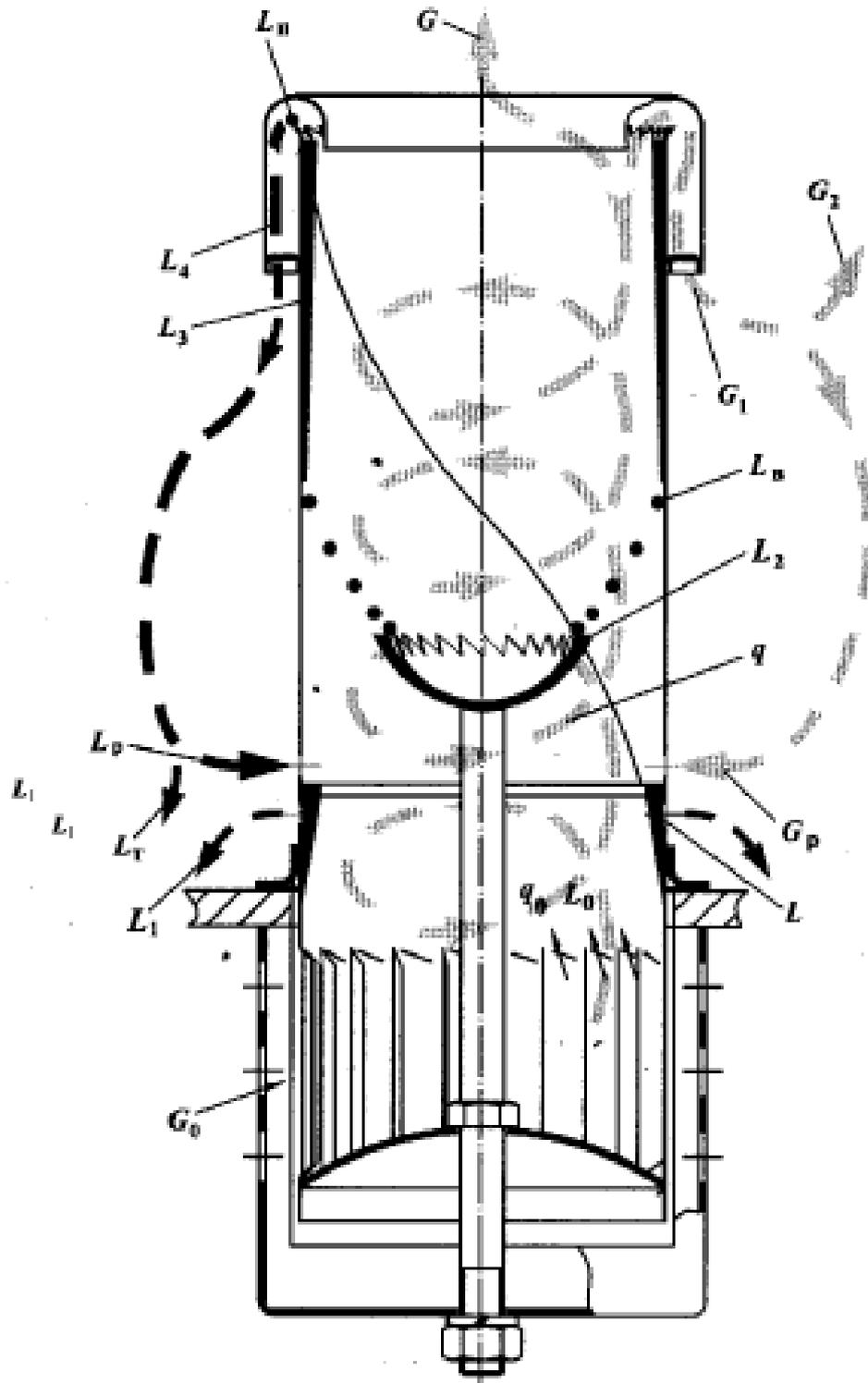


Рисунок 1.15 - Модернизированный ЦЭ (разработчики Зиберт А.Г. и Зиберт Г.К.)

Обозначения: $q_0 L_0$ – газожидкостной поток, закручивающийся в завихрителе; q – основной газожидкостной поток; G – очищенный газ; G_0 – входящий газ-

жидкостной поток; G_1 – часть газа, отбираемая на рециркуляцию; G_2 – часть газа, уходящего с очищенным; G_p – часть газа, возвращаемая на рециркуляцию; L_1, L_m – потоки жидкости, направляемые на тарелку; L – отверстия в корпусе для предварительного отбора жидкости; L_2 – коалесцирующий слой жидкости на поверхности вытеснителя; L_3 – вращающийся, поднимающийся слой жидкости; L_4 – отбираемый в ловушку поток жидкости; L_b – укрупненные (коалесцированные) капли жидкости; L_n – формирующиеся в ловушке капли жидкости; L_p – рециркулируемая жидкость

В конечном итоге, авторы отказались от поперечной рециркуляционной трубы, установили после завихрителя диафрагму и перфорировали обечайку с двух сторон диафрагмы. Через отверстия до диафрагмы отводят излишки жидкости, а через отверстия после диафрагмы во внутреннюю полость обечайки подают газ рециркуляции. Вытеснитель закреплен на вертикальном стояке. Такая конструкция позволяет устранить помехи при формировании центробежного поля и сохранить вытеснитель который необходим для устранения циркуляционных и обратных токов в приосевой зоне. Вытеснитель также снабжен коалесцирующими зубьями ориентированными по направлению закрутки для срыва потоком укрупненных капель. Внесены также изменения в пленкосъемнике – в нем установлено устройство для отдельного отвода газа и жидкости. Кроме того, цилиндрическая обечайка выполняется из бесшовной трубы или вальцуется из листа формы параллелограмма с последующей сваркой по спирали закрученной по направлению движения потока. Унос аэрозолей с газом из ЦЭ 5 – 10 мг/м.³.

Рассмотренный ЦЭ, не смотря на сложность в изготовлении, имеет резерв по снижению уноса аэрозолей с газом при условии устранения вторичного уноса капель, отскочивших из периферии, особенно критичен участок внутренней поверхности обечайки, на которую приходится массовое осаждение капель генерируемых зубьями вытеснителя в приосевую зону.

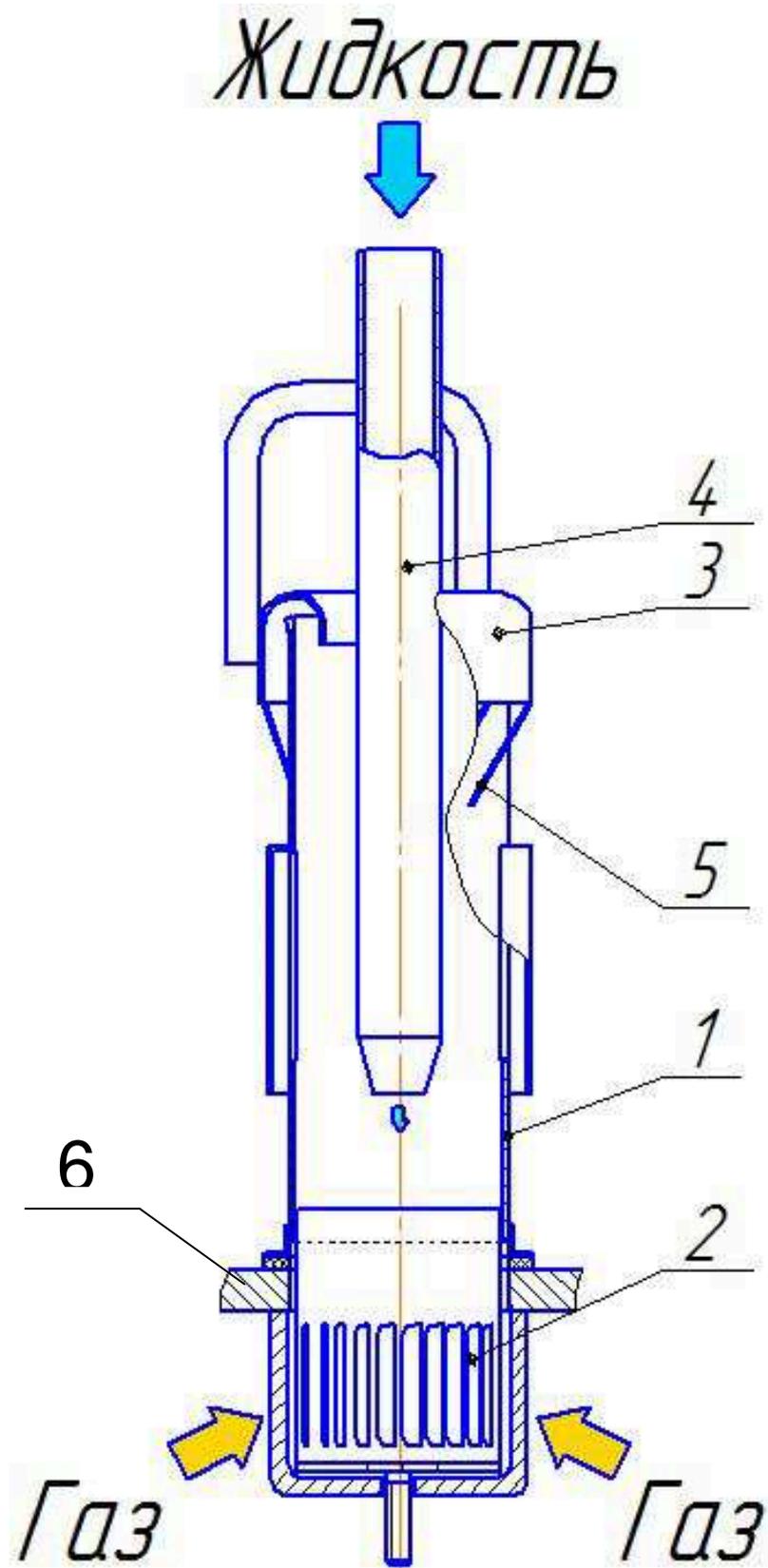
Однако центральная чаша элемента создает большое гидравлическое сопротивление потоку.

В сепарационном центробежном элементе ОАО «НИПИГАЗ», (рисунок 1.14) проблема вторичного уноса из сепарационной зоны практически ,решена. Чашеобразный вытеснитель заменен на многофункциональный цилиндрический расположенный соосно по всей длине обечайки. Снизу вытеснитель выполнен в форме сопла, сечение которого ограничивает расход газа рециркуляции транспортирующего через перфорацию 7 в зону действия центробежных сил жидкость, осевшую в результате вторичного уноса на внешнюю поверхность вытеснителя. Нижняя часть вытеснителя (0,5 его длины) снабжена коалесцирующей поверхностью для предотвращения образования пленочного течения жидкостью поступающей из сопла 6.

Унос аэрозолей с газом через боковой канал пленкосъемника 4 снижен путем выполнения выходного торца обечайки в форме овала.9 через который жидкость перетекает в пленочном режиме, а на выходе из бокового канала пленкосъемника установлены направляющие экраны 10 которые до улавливают из газового потока капельную жидкость. Унос аэрозолей с газом из элемента не превышает 5 мг/м^3

Повышенные требования к качеству перерабатываемого ПНГ предопределили необходимость в проведении экспериментальных работ по созданию высокоэффективного центробежного сепарационного элемента. Полученные данные ,в большинстве своем, достоверны для всех прямоточных центробежных сепарационных элементов в диапазоне эффективного угла закрутки $40 - 55^0$. Ниже приведены основные результаты экспериментальных работ по созданию тарелки с прямоточным ЦЭ повышенной эффективности.

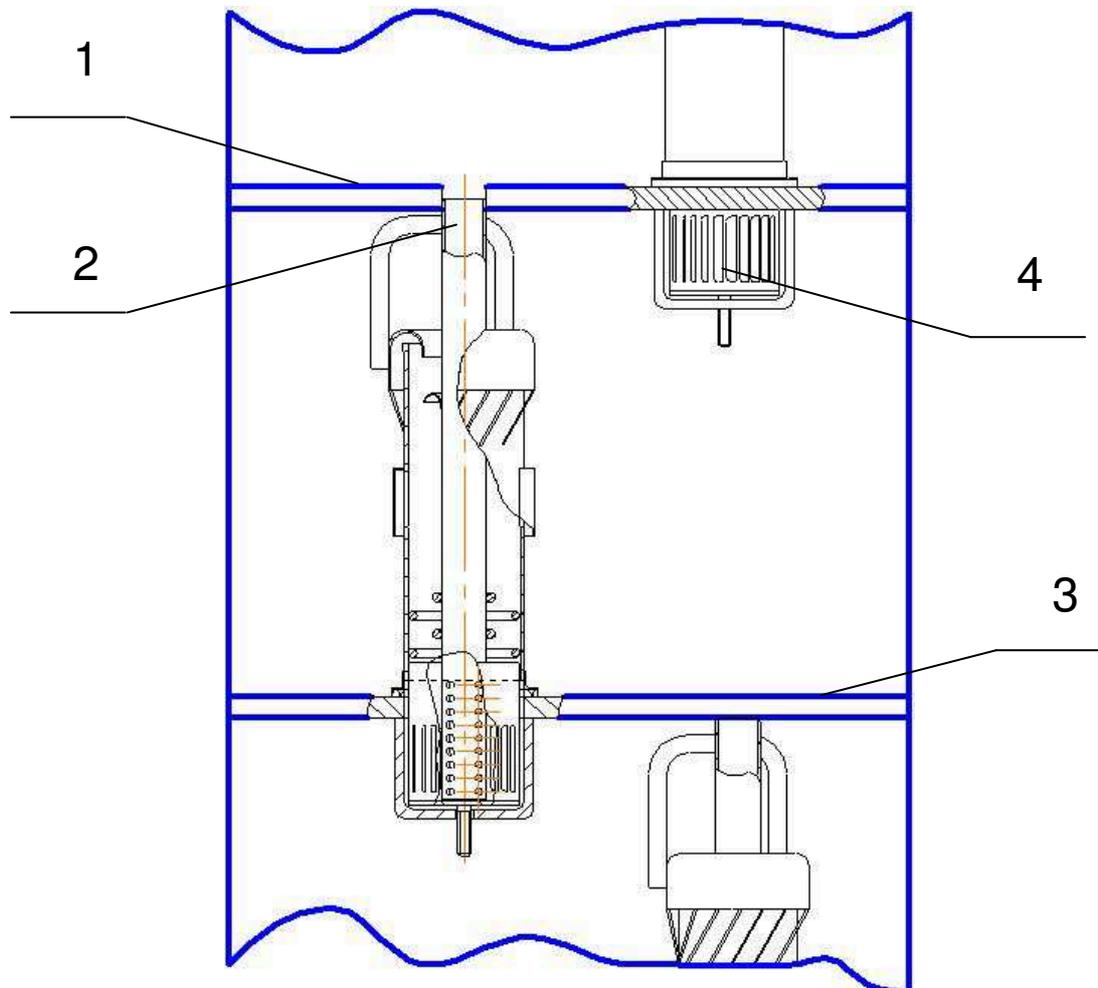
Эта тарелка является наиболее подходящей основой для разработки центробежного массообменного элемента. Принципиальная схема которого приведен на рисунке 1.16.



1 – корпус; 2 – завихритель; 3 – каплеотбойник; 4 – питающая трубка; 5 - отсекающий каплевого уноса; 6- полотно тарелки.

Рисунок 1.16 - Принципиальная схема тарелки с центробежным массообменным элементом

В этой конструкции отсутствует воронка и поперечная трубка для подачи жидкости, а значит формирование закрученного потока будет происходить без помех создаваемых этими устройствами. Элемент состоит из корпуса 1, завихрителя 2, каплеотбойника 3 и, взамен воронки в корпус элемента 1 устанавливается питающая трубка 4, соединенная с верхней тарелкой и подающая сырье напрямую в центр разряженной области. При этом трубка не мешает интенсификации центробежного поля, а наоборот усиливает его за счет вытеснения объема в центре. Для уменьшения уноса предполагается добавить отсекатели капельного уноса 5. Принципиальная схема работы исследуемых тарелок с данными элементами представлена на рисунке 1.17.



1 – верхнее полотно тарелки; 2 – питающая трубка центробежного элемента;
3 – нижестоящее полотно тарелки; 4 – завихритель центробежного элемента

Рисунок 1.17 - Принципиальная схема работы исследуемых тарелок

Жидкость с поверхности тарелки стекает в центральную трубку нижележащих элементов. Газ поднимается с нижнего уровня тарелок. В центробежном массообменном элементе происходит массообмен между жидкостью и газом с последующим разделением. После чего жидкость отбивается на нижний уровень тарелок, а газ уходит на верхний.

Выводы:

1. На основании поэлементного анализа существующих конструкций массообменных устройств автором предложена собственная конструкция, которая ликвидирует недостатки существующих массообменных устройств

2. Для обоснования выбора рациональных параметров предлагаемой автором конструкции необходимо:

- изучить специфику движения газожидкостного потока в центробежном поле;
- разработать методику расчета центробежного массообменного устройства;
- проверить экспериментально теоретические положения методики расчета;

3. На основании 1 и 2 построить графоаналитические зависимости выбора параметров технологического процесса.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО МАССООБМЕННОГО УСТРОЙСТВА

В качестве экспериментальной модели центробежного массообменного элемента выбран промышленный образец центробежного сепарационного элемента ТУ3615-0007-00142300-2003 представленный на рисунке 1.16 с различными вариациями глубины посадки центральной трубки, названной конструктивным фактором.

Ряд конструкционных особенностей центробежного массообменного элемента обуславливает создание расчетной методики для определения основных его характеристик.

С учетом вращательного движения газа внутри элемента, для расчета производительности $Q_{эл}$ применим равенство критериев Вебера для проектных и стендовых условий, соответственно. Равенство критериев Вебера исходит из равенства характеристических размеров, которые равны диаметрам ЦМЭ. Исходя из этого, получим:

$$\frac{\rho_{гс} \cdot W_{гс}^2}{\sigma_c} = \frac{\rho_{гр} \cdot W_{гр}^2}{\sigma_p}, \quad (2.1)$$

где $\rho_{гс}$ – плотность газа стендовая при $P=0,1013$ МПа и $t=20^\circ\text{C}$, кг/м³;

$\rho_{гр}$ – плотность газа расчетная, кг/м³;

$W_{гс}$ – линейная скорость газа стендовая, м/с;

$W_{гр}$ – линейная скорость газа расчетная, м/с;

σ – поверхностное натяжение на границе раздела между газом и жидкостью, Н/м.

Согласно методики расчета сепарационных секций массообменных аппаратов, разработанной в ОАО «НИПИгазпереработка», скорость газа в прямоточно-центробежном массообменном элементе:

$$W_{\text{ГС}} = \frac{4Q_{\text{ЭЛ}}}{\pi \cdot (d_{\text{Ж}}^2 - d_{\text{Т}}^2) \cdot 3600}, \quad (2.2)$$

где $Q_{\text{ЭЛ}}$ – объемный расход газа (объемная производительность) для прямоточно-центробежного элемента, м³/ч; при $P=0,1013$ МПа и $t=20^{\circ}\text{C}$; [35]

$d_{\text{Т}}$ – диаметр питающей трубки (внешний), м;

$d_{\text{Ж}}$ – диаметр кольца жидкости внутри ЦМЭ в выбранном сечении (внутренний), м.

$$d_{\text{Ж}} = d - \frac{Q_{\text{Ж}} \cdot 10^{-3}}{S_{\text{ЭЛ}} \cdot 3600} \quad (2.3)$$

где $Q_{\text{Ж}}$ – объемный расход жидкости в л/час;

$S_{\text{ЭЛ}}$ – площадь внутренней поверхности обечайки центробежного массообменного устройства, м.

$$S_{\text{ЭЛ}} = \pi \cdot d \cdot l, \quad (2.4)$$

где d – диаметр элемента (внутренний), для Ду50 равен 0,05м;

l – высота цилиндрической части ЦМЭ, для Ду50 равна 0,2м.

Расчетная скорость газа в прямоточном центробежном массообменном элементе:

$$W_{\text{Гр}} = W_{\text{ГС}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{ГС}} \cdot \sigma_{\text{р}}}{\rho_{\text{Гр}} \cdot \sigma_{\text{с}}}}, \quad (2.5)$$

Расчетная площадь живого сечения прямоточных центробежных элементов:

$$F_{\text{р}} = \frac{q_{\text{г}}}{W_{\text{Гр}}}, \quad (2.6)$$

где q_{Γ} – объемный расход газа при рабочих условиях, м³/с;

Действительная площадь прямоточно-центробежных массообменных элементов

$$F_{\text{д}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{ж}}^2 - d_{\text{T}}^2) \cdot n_{\text{д}}}{4}, \quad (2.7)$$

Действительная скорость газа в прямоточно-центробежном массообменном элементе

$$W_{\text{ГД}} = \frac{q_{\Gamma}}{F_{\text{д}}}, \quad (2.8)$$

Максимальная действительная объемная производительность

$$Q_{\text{максд}} = \frac{F_{\text{д}} \cdot W_{\text{ГД}} \cdot 3600 \cdot (P + P_{\text{ст}}) \cdot (t_{\text{ст}} + 273) \cdot Z_{\text{ст}}}{P_{\text{ст}} \cdot (t + 273) \cdot Z}, \quad (2.9)$$

где Z – коэффициент сжимаемости, $Z_{\text{ст}} = 1,0$ при $P = 0,1013$ МПа, $t = 20^{\circ}\text{C}$;

P – давление (избыточное), МПа;

$P_{\text{ст}} = 0,1013$ МПа.

На ступени с тангенциальными завихрителями в зависимости от расхода газа наблюдается три режима течения газожидкостной смеси: барботажный, кольцевой и пленочный. Для получения развитой межфазной поверхности при низкой скорости газа в каналах и, следовательно, невысоком гидравлическом сопротивлении наибольший интерес представляет кольцевой режим течения, который достигается при некоторой «критической» скорости газа на выходе из канала. При этом жидкость из центральной части ступени силой инерции перемещается к периферии, образуя вращающийся газожидкостный слой с начальной полостью. По мере роста скорости газа в каналах происходит уменьшение толщины газожидкостного слоя и увеличение его высоты.

Из теоремы об изменении кинетического момента определим связь между угловой скоростью газожидкостного слоя на ступени и ее конструктивными параметрами:

$$J \frac{dw}{dt} = M_{\text{вр}} - M_{\text{тр}} \quad (2.10)$$

Момент, обеспечивающий вращение газожидкостного слоя, равен:

$$M_{\text{вр}} = \tau_{\text{г-ж}} S R = \frac{\lambda_{\text{г-ж}} \rho_{\text{г}} u_{\text{г}}^2}{8} (f + f_{\text{стр}}) R_3 \cos \alpha \quad (2.11)$$

Момент сил трения о стенки и дно ступени составляет:

$$M_{\text{тр}} = \frac{\lambda_0 \rho_{\text{г-ж}} u_{\text{г-ж}}^2}{8} \pi (R_c^2 - R_l^2) (R_c - R_l) \quad (2.12)$$

Величину коэффициента гидравлического сопротивления на стенке принимали априори равной величине коэффициента гидравлического сопротивления исходного прототипа $\lambda_0 = 0.04$.

Тогда:

$$J \frac{dw}{dt} = \frac{\lambda_{\text{г-ж}} \rho_{\text{г}} u_{\text{г}}^2}{8} (f + f_{\text{стр}}) R_3 \cos \alpha - \frac{\lambda_0 \rho_{\text{г-ж}} u_{\text{г-ж}}^2}{8} \pi (R_c^2 - R_l^2) (R_c - R_l) \quad (2.13)$$

Приняв, что скорость вращения газожидкостного слоя у стенки $u_{\text{г-ж}} = w R_c$, поверхность контакта струй газа выходящих из каналов завихрителя с жидкостью $f = n \cdot l_d \cdot h$, получим:

$$w = \left[\frac{\lambda_{\text{г-ж}} \rho_{\text{г}}}{\lambda_0} \frac{(f + f_{\text{стр}}) \cos \alpha u_{\text{кр}}^2}{(R_c^2 - R_l^2) (R_c - R_l) R_c^2} \right]^{0,5} \quad (2.14)$$

где F – площадь сечения, поверхность, м²;

f – суммарная площадь сечения каналов, м²;

h – высота каналов для прохода газа, м;

J – момент инерции, (кг м²)/с;

l – длина, м;

M – масса, кг;

n – число каналов, пузырьков газа, шт;

R – радиус, м;

R_1 – радиус внутренней полости, м;

S – поверхность контакта, м²;

u – среднерасходная скорость, м/с;

$u_{г}$ – среднерасходная скорость в каналах, м/с;

w – угловая скорость, с⁻¹;

α – угол наклона стенки канала к касательной окружности завихрителя, град;

λ – коэффициент гидравлического сопротивления;

Индексы:

в – вода;

г – газ;

ж – жидкость;

з – завихритель;

к – критический;

м – мокрый;

н – начальный;

о – стенка;

с – ступень;

Согласно экспериментальным данным величина угловой скорости газожидкостного слоя зависит от радиуса контактной ступени, что обусловлено, по-видимому, силами вязкого трения между вращающимися слоями и разной скоростью их движения.

Определив коэффициент проскальзывания как $K = w/w_{\text{оп}} = 2,5-3$ по уравнению (2.14), можно оценить величину угловой скорости газожидкостной смеси при переходе из барботажного режима течения в кольцевой.

Скорость газа в каналах завихрителя, обеспечивающая переход из барботажного режима течения в кольцевой, зависит как от конструктивных параметров завихрителя (радиуса, величины зазора, количества каналов для прохода газа и угла их размещения), так и от физических свойств (плотности и сил вязкого трения) [5]. Критериальное уравнение для расчета критической скорости газа принято на основе анализа уравнения (2.14):

$$u_K = C_1 \left[\frac{\lambda_0 \rho_{2-ж} F R_c}{\lambda_{2-ж} \rho_2 f R_3 \cos \alpha} \frac{1}{\cos \alpha} \right]^{0,5}, \quad (2.15)$$

где поверхность контакта газожидкостного слоя о боковую поверхность ступени рассчитывалась как $F = \pi D_c H$.

Как установлено экспериментально и подтверждается расчетом по уравнению (2.15), с уменьшением угла наклона каналов переход из барботажного режима в кольцевой происходит при меньшей скорости газа. Увеличение коэффициента динамической вязкости жидкости на ступени, по-видимому, приводит к росту касательных напряжений на межфазной поверхности и увеличению скорости газа в каналах завихрителя, что, в свою очередь, обеспечивает вращательное движение жидкости.

Для расчета примем скорость газа в прямоточно-центробежном массообменном элементе:

$$W_{гс} = \frac{4Q_{эл}}{\pi \cdot d_{ж}^2 \cdot 3600}, \quad (2.16)$$

Расчетная скорость газа в прямоточном центробежном массообменном элементе:

$$W_{гр} = W_{гс} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{гс} \cdot \sigma_p}{\rho_{гр} \cdot \sigma_c}}, \quad (2.17)$$

Расчетная площадь живого сечения прямооточных центробежных элементов:

$$F_p = \frac{q_r}{W_{гр}}, \quad (2.18)$$

Для определения диапазона границ эффективной работы при изменяющихся условиях эксплуатации для аппарата строится график зависимости производительности от давления при разных рабочих температурах $Q = f(P)$. Для построения графика $Q = f(P)$ необходимо определить действительную максимальную $Q_{maxд}$ и минимальную Q_{min} предельные объемные производительности для необходимого и достаточного числа значений давления в интервале от P_{max} до P_{min} при расчетной температуре:

$$Q = \frac{W \cdot F_d \cdot 3600 \cdot (P + P_{ст}) \cdot (t_{ст} + 273) \cdot Z_{ст}}{P_{ст} \cdot (t + 273) \cdot Z}, \quad (2.19)$$

Максимальной предельной объемной производительности $Q_{maxд}$ соответствует критическая скорость – $W_{кр}$, минимальной предельной объемной производительности $Q_{minд} - W_{min} = 0,3 \dots 0,5 \cdot W_{кр}$

Межфазная поверхность определяется газосодержанием и диаметром пузырьков газа. В начале кольцевого режима газосодержание в жидкости максимально, а затем, с повышением скорости газа, снижается вследствие уменьшения размеров пузырьков и вымывания их из газожидкостного слоя. С увеличением объема жидкости на контактной ступени величина газосодержания понижается.

Среднеповерхностный диаметр пузырьков газа рассчитывался путем обработки фотоснимков газо-жидкостного слоя по формуле:

$$d_n = \sqrt{\frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i}} \quad (2.20)$$

Для расчета гидравлического сопротивления элемента автором была предложена параболическая зависимость гидравлического давления ΔP от фактора скорости F_c следующего вида, подтверждаемая экспериментальным путём:

$$\Delta P = A \cdot F_c^2 - B \cdot F_c + C, \quad (2.21)$$

где A, B, C – коэффициенты гидравлического сопротивления, определяемые для каждого элемента экспериментальным путем.

Одной из важнейших характеристик массообменного устройства является капельный унос жидкости. Автором установлена полиномиальная зависимость уноса жидкости η (%) от фактора скорости F_c .

$$\eta = A_1 \cdot F_c^4 - B_1 \cdot F_c^3 + C_1 \cdot F_c^2 - D_1 \cdot F_c + E_1, \quad (2.22)$$

где A_1, B_1, C_1, D_1, E_1 – коэффициенты капельного уноса, определяемые для каждого элемента экспериментальным путем.

Исследования проводятся на промышленном образце, промышленных расходах и модельных средах (смеси воздух-вода). Моделирование эксперимента проводится по фактору параметра потока [32]:

$$F = \frac{L}{V} \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_L}}, \quad (2.23)$$

где V – нагрузка по газу в колонне, кг/с;

L – нагрузка по жидкости в колонне, кг/с;

ρ_v – плотность паров газа, кг/м³;

ρ_L – плотность жидкости, кг/м³.

Сравнение показателей полученных экспериментально проводились по фактору скорости потока:

$$F_c = V_{сеч} \sqrt{\rho V} , \quad (2.24)$$

где $V_{сеч}$ – скорость потока в сечении, кг/с

Выводы:

1. На основании полученных теоретических зависимостей необходимо провести экспериментальные исследования для определения опытным путем коэффициентов гидравлического сопротивления и капельного уноса, являющихся важным фактором в установлении показателей эффективности работы тарелки с центробежными элементами.

2. Для проведения экспериментальных исследований необходимо разработать испытательный стенд, а так же методику проведения экспериментальных исследований для подтверждения опытным путем теоретических выводов.

3 ОПЫТНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

3.1 Разработка экспериментальной модели центробежного массообменного устройства

На основании полученных в разделе 2 данных автором было разработано две группы моделей. Три модели, представляющие первую группу, отличаются высотой посадки питающей трубки от дна элемента. Это отличие является конструктивным фактором и его значения приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Конструктивный фактор эксперимента

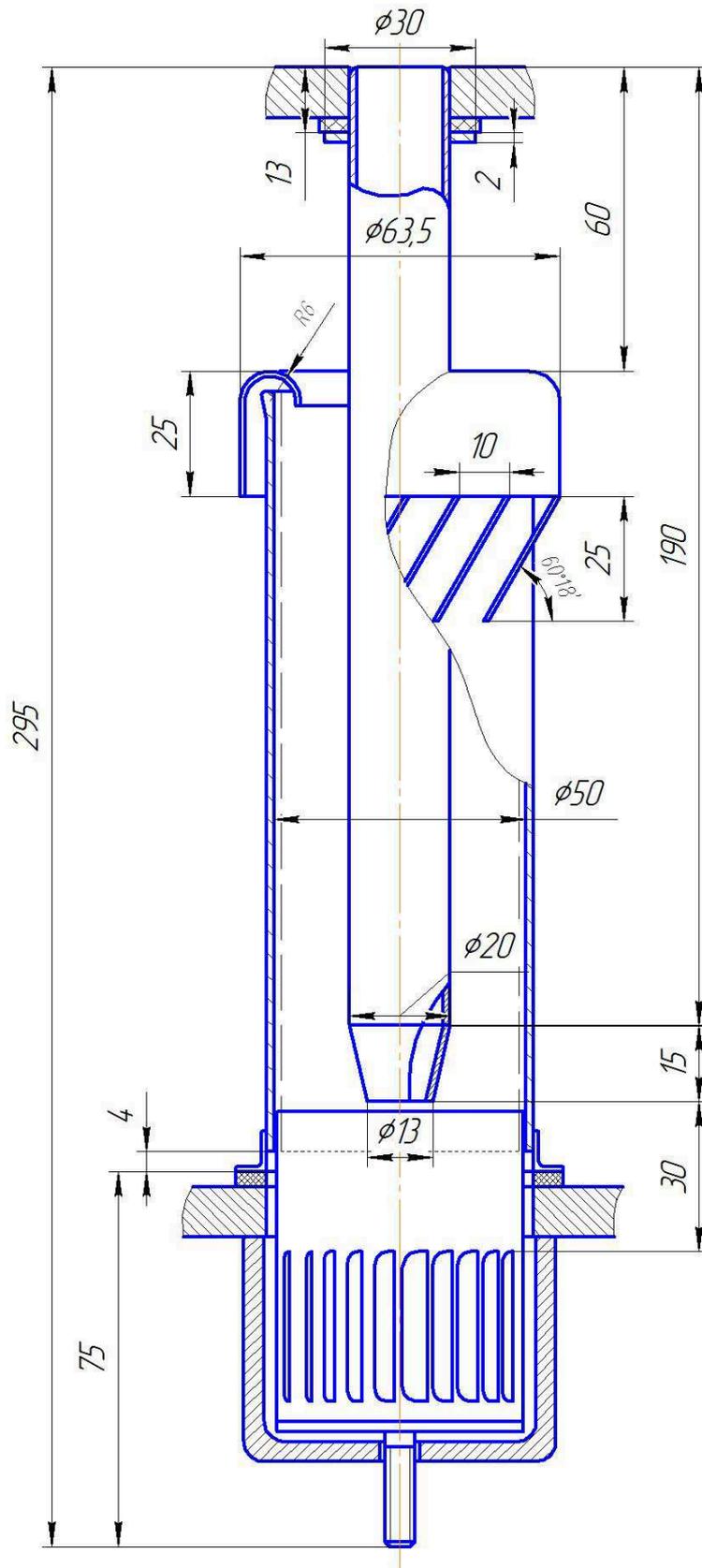
	№ экспериментального образца			Интервал варьирования, мм
	1 (рис. 14а)	2 (рис. 14б)	3 (рис. 14в)	
Конструктивный фактор, мм	14	64	114	50

Две другие модели второй группы имеют иные отличительные конструкционные особенности.

Исходному центробежному элементу, взятому за основу разработки, был задан диапазон производительности по газу (150-450м³/ч). Его же было решено использовать для предварительных стендовых испытаний. Для этого предполагаемый диапазон расхода воздуха был поделен на три равных интервала (см.таблицу 3.2). К полученным четырем значениям расхода воздуха рассчитывались значения параметра расхода воды, вычисляемых из соотношений расхода воды к воздуху 3/5, 3/4 и 9/10 на один центробежный элемент. Результаты расчета приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Соотношения расхода воды и воздуха

Расход воздуха, м ³ /ч	150			250			350			450		
Расход воды, л/ч	90	115	135	150	190	225	210	260	315	250	300	360



Для исследуемых моделей первой группы была составлена таблица 3.3 исходных данных для проведения экспериментальных исследований.

Таблица 3.3 - Значения варьируемых факторов центробежного массообменного элемента

№ модели экспериментального образца	Расход воздуха, м ³ /ч	Расход воды, кг/ч	Конструктивный фактор, мм
Модель №1	150	90	14
		115	
		135	
	250	150	
		190	
		225	
	350	210	
		260	
		315	
	450	270	

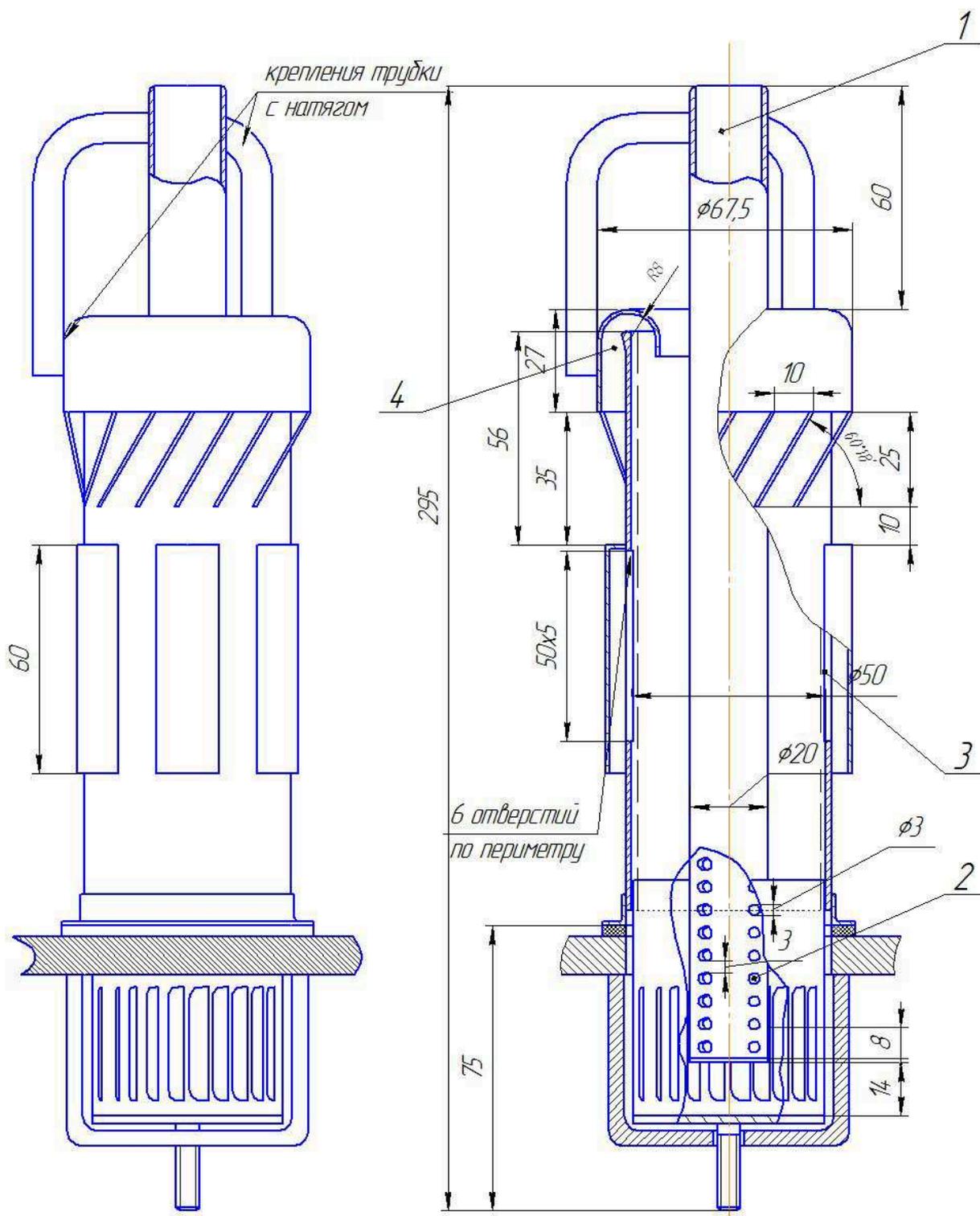
Продолжение таблицы 3.3

№ модели экспериментального образца	Расход воздуха, м ³ /ч	Расход воды, кг/ч	Конструктивный фактор, мм
Модель №1	450	340	14
		405	
Модель №2	150	90	64
		115	
		135	
	250	150	
		190	
		225	
	350	210	
		260	
		315	
	450	270	
		340	
		405	

Продолжение таблицы 3.3

№ модели экспериментального образца	Расход воздуха, м ³ /ч	Расход воды, кг/ч	Конструктивный фактор, мм		
Модель №3	150	90	114		
		115			
		135			
	250	150			
		190			
		225			
	350	210			
		260			
		315			
	450	270			
		340			
		405			
	Интервал варьирования	100		-	50

Модели 4 и 5, показанные на рисунке 3.2а-б, разработанные второй очередью имеют свои отличительные конструкционные особенности и составляют вторую группу экспериментальных моделей.



а - экспериментальная модель №4

отверстий 2. Отверстия просверлены таким образом, что поток жидкости, проходящий через них и поток воздуха, подающийся через завихритель, направлен в одну сторону. Это позволит избежать раздробления потока жидкости и направит его непосредственно на стенки элемента, где он будет подхватываться потоком газа и после массообмена направляться на сепарацию. Так же конструкции 4 и 5 снабжены боковыми отверстиями 3 для отвода предварительно отсепарированной жидкости. Все элементы второй группы конструкций имеют увеличенный зазор 4 между каплеотбойником и обечайкой для отвода из зоны сепарации большего количества жидкости, по сравнению с первой группой конструкций.

В модели 5 так же имеется питающая трубка и боковые отверстия 1 в корпусе для предварительного отвода отсепарированной жидкости. Основным отличием является гидрозатвор. Для этого центральная трубка 3 установлена таким образом, что она проходит через дно элемента, и подача жидкости осуществляется в специальный стакан 2. Массообмен происходит уже в стакане 2, когда газ проходит в завихритель через слой жидкости. Далее смешанный поток под действием центробежных сил проходит на сепарацию по стенкам 5 элемента. Данный образец имеет патент на полезную модель (Приложение Б)

Таким образом, для проведения полномасштабного эксперимента было разработано 5 моделей.

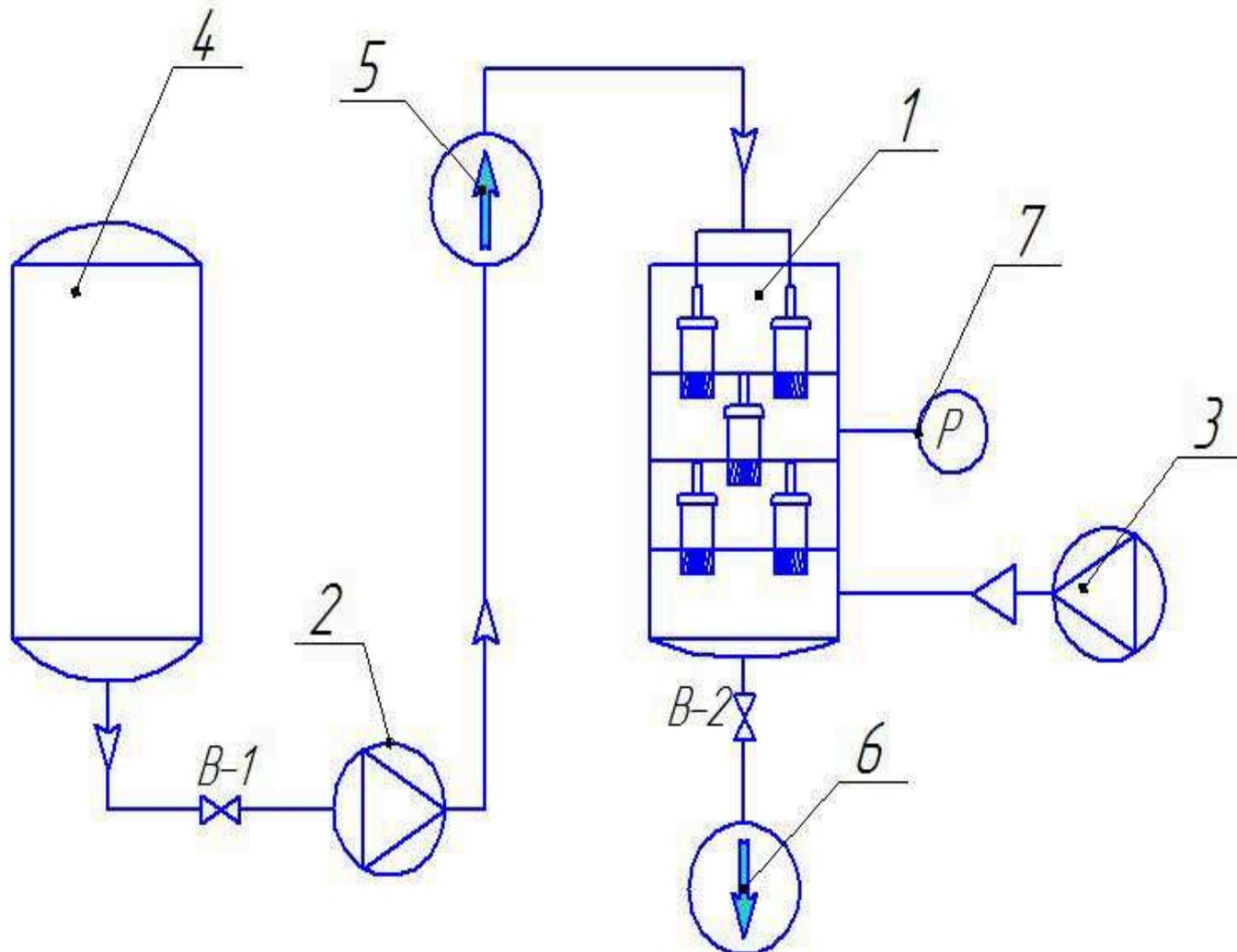
3.2 Планирование испытаний экспериментальной модели

Исследования массообменных контактных устройств проводились на гидродинамических стендах, расположенных в лабораторном корпусе ОАО «НИПИгазпереработка».

Эксперименты включали в себя работу на двух стендах. Первый стенд предназначен для демонстрации работы элемента, а так же для определения его эффективности по капельному уносу жидкости и гидродинамическому сопротивлению.

3.2.1 Принцип работы стенда для определения капельного уноса жидкости и гидродинамического сопротивления центробежного массообменного устройства

Принципиальная схема стенда приведена на рисунке 3.3.



1 – экспериментальная колонна; 2 – насос; 3 – воздуходувка; 4 – накопительная емкость; 5,6 – расходомер; 7 – датчик давления.

Рисунок 3.3. Принципиальная схема экспериментальной установки.

Измерительная схема стенда включала:

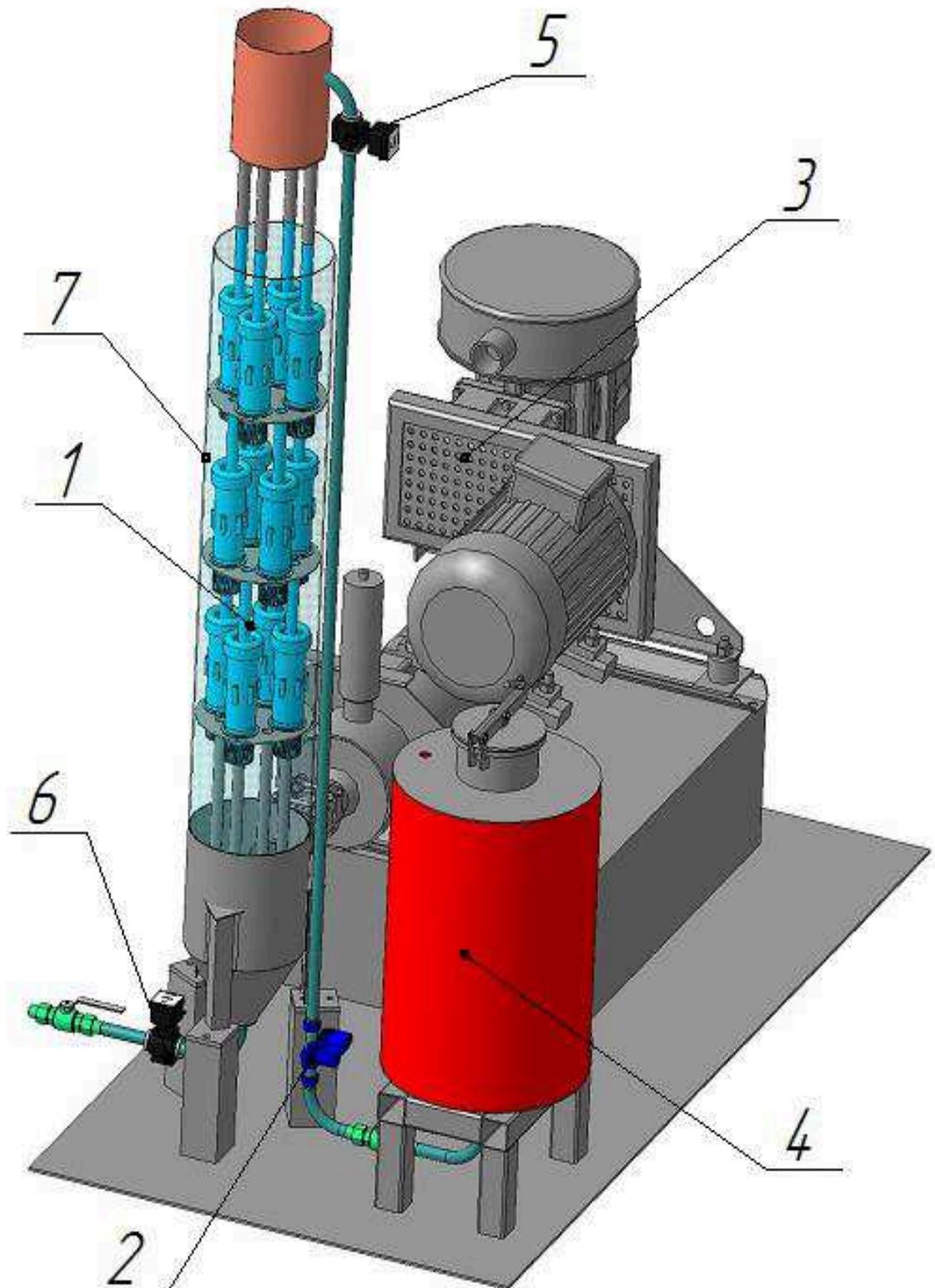
- электронные расходомеры жидкости (ТЕРЛОКОМ-РЕМ);
- многофункциональный измерительный прибор для контроля систем ОВК (testo 435)
- секундомер;
- мерная емкость (20л);

- термометры стеклянные. [29]

Разработанные образцы установлены в колонне 1. В питающие трубки центробежных массообменных элементов с помощью насоса 2 подается жидкость из ёмкости 4. Расход поступающей жидкости контролируется расходомером 5. Воздуходувкой 3 в колонну нагнетается воздух. В процессе массообмена в колонне отсепарированная жидкость удаляется через отверстие в днище и замеряется расходомером 6. Разница между показаниями расходомеров 5 и 6 покажет количество потерь жидкости в процессе массообмена и сепарации, тем самым обозначив эффективность массообменных устройств. Гидросопротивление образца замеряется датчиком давления 7.

Экспериментальный стенд предназначен для исследования прямоточных центробежных массообменных элементов, выполненных в натуральную величину и рабочей средой с параметрами смеси жидкость-воздух, подобными средам в действующих массообменных аппаратах.[30]

Рабочим телом в исследованиях послужила смесь вода-воздух.



1-колонна; 2-насос; 3-воздуходувка; 4-ёмкость для жидкости; 5,6-расходомер жидкостный; 7-датчик давления.

Рисунок 3.4 Общий вид экспериментальной установки

3.2.2 Методика проведения эксперимента по определению капельного уноса жидкости и гидродинамического сопротивления центробежного массообменного устройства

Необходимый объем воды в 300 л закачивается в ёмкость 4. Испытываемые образцы центробежных массообменных устройств устанавливаются на тарелки колонны 1. Тарелки устанавливаются одна над другой с поворотом на 45° относительно предыдущей тарелки вокруг оси. Такое расположение позволяет совместить сливные отверстия верхней тарелки, с питающими трубками элементов нижней тарелки. Над колонной установлена распределительная ёмкость, необходимая для равной подачи жидкости во все элементы верхней тарелки.

Работа установки начинается с запуска воздуходувки 3 и выставления её производительности на требуемый расход. Для первого эксперимента это значение принимается в $150 \text{ м}^3/\text{ч}$. Далее на заданный расход выставляется дозирующий жидкостной насос 2, согласно таблице 2.3. Расход насоса контролируется расходомером 5.

После запуска воздуходувки и выхода её на установленную производительность запускается насос подачи воды 2. Как только расходомер 5 начнет фиксировать данные о расходе жидкости – начинается отсечка времени эксперимента с помощью секундомера. Длительность эксперимента 5 минут.

Жидкость попадает в центр центробежного поля верхних элементов, где происходит её массообмен с воздухом с последующим сепарированием.

Отсепарированная жидкость попадает на тарелку, откуда поступает в элементы последующей ступени. Таким образом процесс массообмена в данном стенде происходит в три ступени, что в реальных условиях позволяет получить высокую эффективность массообмена и очистки газа [36].

Во время экспериментальной работы стенда необходимо измерить гидравлическое сопротивление тарелок для последующего расчета гидравлического сопротивления одного элемента. Для исследования этой величины центробежных элементов, а так же для измерения параметров используемого окружающе-

го воздуха в эксперименте использовался многофункциональный профессиональный измерительный прибор testo 435 со встроенной функцией измерения дифференциального давления для систем ОВК и оценки качества воздуха. Погрешность измерения прибора составляет $\pm 0.3\%$. [38]

Перед экспериментом необходимо выставить параметры окружающего воздуха (использован прибору testo 435, такие как давление, температура, влажность. Все эти параметры прибор фиксирует сам и требуется только сохранить их как эталонные. Так же выставляется и диаметр колонны с испытываемыми образцами. После чего прибор готов к работе и в процессе эксперимента остается только подключить его к специальному отверстию 7 на колонне и начать сбор данных эксперимента.

В нижней части колонна 1 имеет сливной патрубок, на котором расположен расходомер жидкости 6, фиксирующий количество жидкости на выходе из установки. По истечении времени эксперимента (5 минут), а так же остановки насоса и воздуходувки, измерения расходомера 6 фиксируются до тех пор, пока вся жидкость не истечет из колонны. Таким образом разница, между показаниями расходомеров 5 и 6 показывает количество жидкости, унесенной из установки или, иными словами, это потери жидкости, связанные с конструкцией и работой центробежных элементов.

Далее все результаты записываются в таблицу для последующей обработки и представлении в графическом виде, а установка настраивается на следующие расходы жидкости и газа. Таким образом, все эти циклы необходимо повторить для каждого испытываемого образца.

3.2.3 Аэродинамические исследования прямого центростремительного массообменного элемента

В качестве модели центростремительного массообменного элемента будет выбрана наиболее перспективная модель по итогам анализа результатов испытаний на стенде №1.

Рабочий процесс в центробежном массообменном аппарате определяется динамикой вращательного потока [2,4]. Структура турбулентного закрученного потока отличается от поступательного наличием вращательной (тангенциальной) и радиальной составляющих скорости, продольного и поперечного градиента давления, значительных турбулентных пульсаций. Центробежные силы деформируют профиль осевой скорости в радиальном направлении. По характеру расположения осевой составляющей скорости вдоль радиуса различают:

- слабо закрученные потоки, имеющие на оси максимальное значение скорости;
- умеренно закрученные потоки, имеющие провал осевой составляющей скорости М-образной формы при отсутствии обратных токов в приосевой зоне течения;
- сильно закрученные потоки с обратными токами вдоль оси.

Основными элементами центробежного массообменного элемента являются: тангенциальный завихритель, с помощью которого формируется закрученный поток; обечайка – проточная часть, по которой происходит движение сформированной жидкостной пленки; каплесьемник, с помощью которого происходит отвод жидкостной пленки из зоны сепарации и питающая трубка, через которую происходит подача жидкости в элемент.

В тангенциальных завихрителях можно получать различные законы радиального изменения скоростных полей на выходе и, тем самым, изменять интенсивность закрутки потока [25, 26].

Важными характеристиками внутренних закрученных течений являются радиус зоны обратных течений, зависящий от интенсивности закрутки потока, максимальные значения составляющих скоростей, угол закрутки потока на стенке канала, азимутальная и радиальная неравномерность поля скоростей.

Для расчета и проектирования сепарационной и массообменной аппаратуры большое значение имеет правильное представление о характере движения потока газа в зоне разделительного узла, что дает возможность

интенсифицировать и оптимизировать газодинамические процессы в аппаратах, повышая их эффективность, добиваясь при этом использования минимальных габаритов.

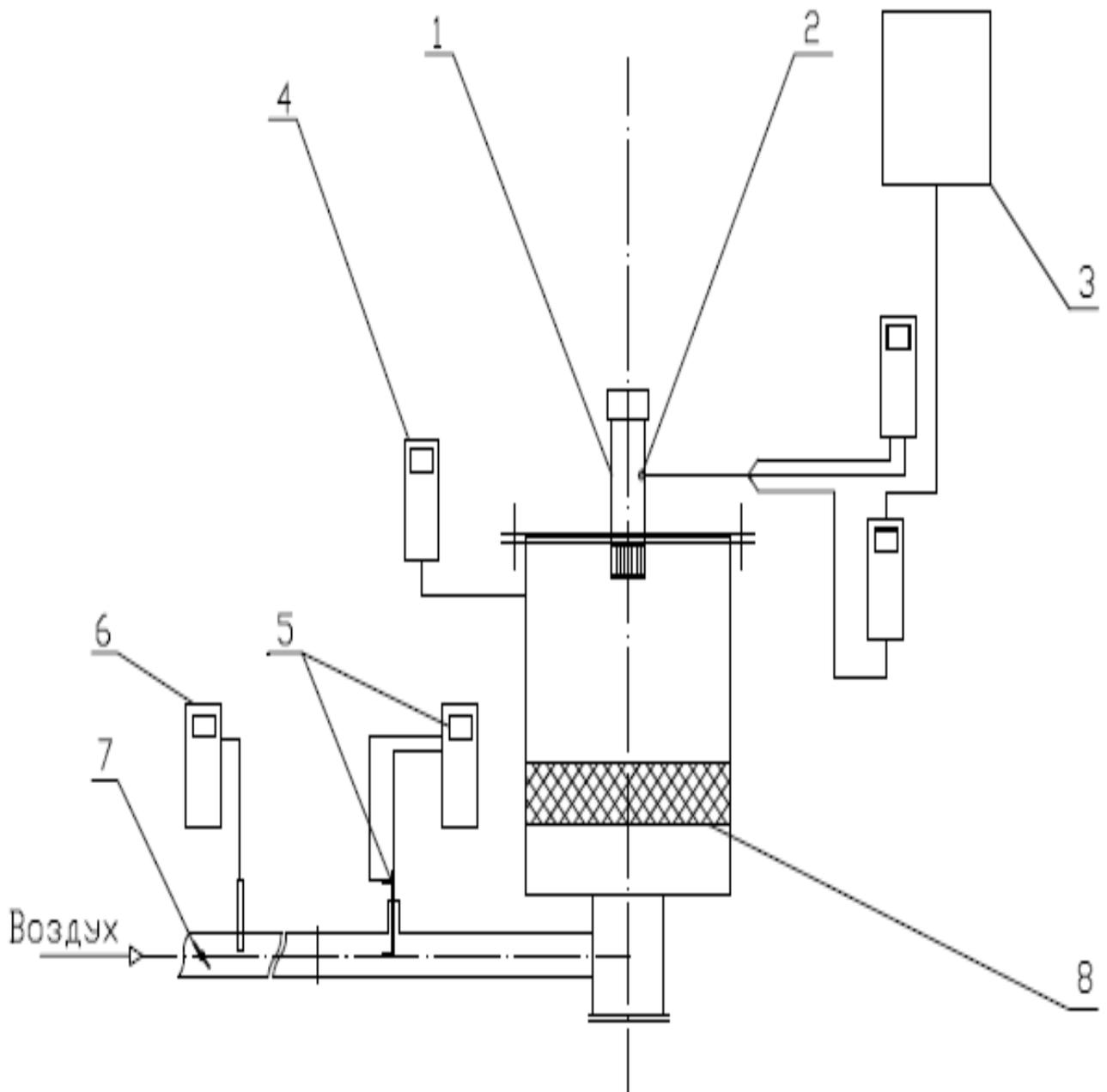
Для представления о характере движения потока необходимо для каждой из существующих моделей центробежного сепарационного элемента знать профили скоростей и углы закрутки потока, находящиеся на разных расстояниях от лопаток завихрителя (в дальнейшем сечениях). Матрица изменения факторов планируемого эксперимента представлена в таблице 3.4.

Таблица 3.4– Матрица изменения факторов проведения эксперимента

№ сечения (расстояние от лопаток завихрителя)	n_1	n_2	n_3
Расход газа перед завихрителем, (м ³ /ч)	Q_k	Q_k	Q_k

3.2.4 Экспериментальный стенд для аэродинамического исследования центробежного массообменного элемента

Аэродинамическое исследование прямого центрального массообменного элемента с профилированной проточной частью проведено на экспериментальном стенде для аэродинамических исследований [6]. Схема экспериментального стенда для определения поля скоростей представлена на рисунке 3.5.



1 – центробежный сепарационный элемент; 2 – трехточечный зонд; 3 – измерительно – считывающий комплекс; 4 – статический отбор (testo 435); 5 – напорная трубка с дифференциальным манометром; 6 – термопара; 7 – дроссельная заслонка; 8 – хонейкомб (выравнивающее устройство).

Рисунок 3.5 – Схема экспериментального стенда для определения поля скоростей после завихрителя

Воздух в подводящий трубопровод диаметром 100мм подается от низконапорного вентилятора. Посредством дроссельной заслонки 7 изменяется

скоростной режим движения газового потока в элементе. Затем поток газа направляется на выравнивающее устройство (хонейкомб) 8, представляющее собой набор трубок длиной 250мм и диаметром 10мм с целью создания одномерного потока газа. После чего поток газа направляется на вход центробежного сепарационного элемента 1. Измерение скорости после завихрителя производится с помощью трехточечного зонда 2, представляющего собой модификацию трубки Пито – Прандтля, который вводится в отверстия, высверленные в корпусе центробежного элемента. Информация о параметрах потока с помощью трехточечного зонда поступает на измерительно – считывающий комплекс 3, где и регистрируется.

Статическое давление на входе центробежного элемента измеряется манометром 4. Динамическое давление на входе в выравнивающий элемент измеряется дифференциальным манометром 5. Измерение температуры газа на входе в выравнивающий элемент производится термопарой 6.

3.2.5 Методика проведения эксперимента по определению аэродинамических исследований центробежного массообменного элемента

Эффективность работы центробежного массообменного элемента во многом зависит от структуры газового потока в нем, поэтому исследования проводились особо тщательно с определением угла закрутки, полного, статического и динамического напоров. Эксперимент проведен для моделей центробежного массообменного элемента с тангенциальным завихрителем с постоянным углом наклона лопаток для всех вариантов $\alpha = 45^0$, при расходах газо-жидкостного потока перед завихрителем $Q_1 = 100 \frac{м^3}{ч}$, $Q_2 = 200 \frac{м^3}{ч}$, $Q_3 = 300 \frac{м^3}{ч}$, $Q_4 = 400 \frac{м^3}{ч}$. Измерения проводились в трех плоскостях (сечениях) центробежного массообменного элемента (рисунок 3.6).

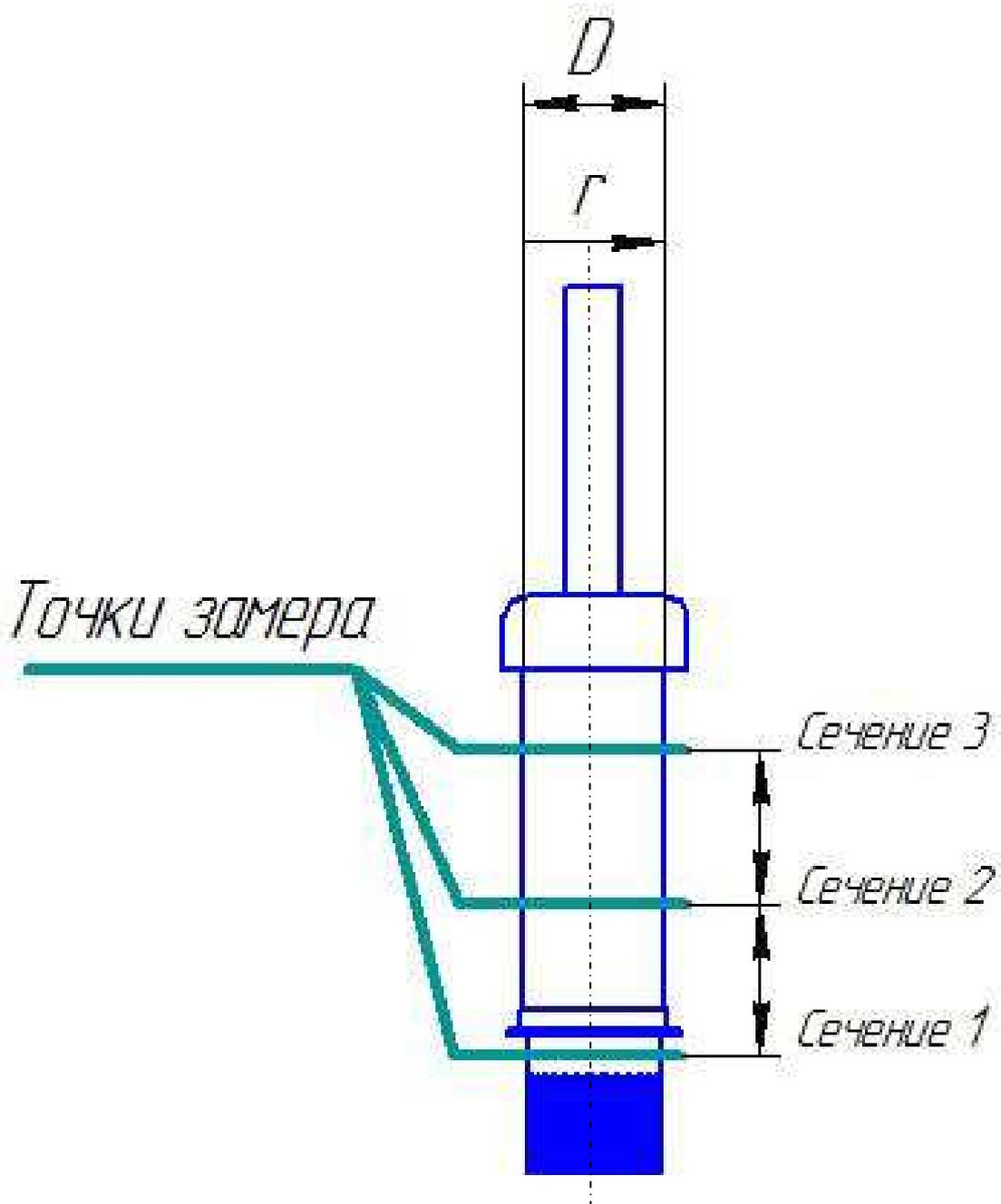


Рисунок 3.6 – Схема расположения секущих плоскостей для измерения параметров потока в прямоточном центробежном массообменном элементе с центральной трубкой

В каждой плоскости проведены 10 замеров; зонд, с помощью колесика-координатника передвигался от периферии к центру элемента по указанным относительным координатам $\frac{r}{R}$ с шагом 5 мм. Поток газа создается с помощью

низконапорного вентилятора, и его величина регулируется с помощью дроссельной заслонки 7.

Трехточечный зонд изготовлен таким образом, чтобы по обеим сторонам от трубки отбора полного давления потока газа располагались трубки отбора статического давления газа. Диаметр трубок составляет 0,5 мм, таким образом, пространственное разрешение зонда было не более 2 мм, что достаточно для целей определения поля скоростей в центробежном элементе.

В опытах для определения угла закрутки потока и скорости, зонд устанавливался в нужной точке по радиусу прямого центростремительного элемента таким образом, чтобы в трубках отбора статического давления оно было одинаковым, т.е. разность давлений равнялась нулю. В этом положении зонда измеряется угол поворота зонда α относительно оси. В этом же положении зонда измеряется динамическое давление газа в трубке, которое определяет скорость потока газа в данной точке.

Угол α отставания вектора скорости от линии, параллельной оси патрубка и проходящей через точку измерения, называется углом закрутки потока и измеряется при равенстве давлений в трубках отбора статического давления. Равенство давлений в трубках статического давления достигается путем вращения зонда вокруг оси, пересекающей ось патрубка. Таким образом, осевую составляющую скорости v_a и тангенциальную составляющую скорости v_z можно определить по формулам:

$$v_a = v \cdot \sin \alpha \quad (3.1)$$

$$v_z = v \cdot \cos \alpha \quad (3.2)$$

В таблице 3.4 представлен журнал для проведения эксперимента по аэродинамическому исследованию прямого центростремительного массообменного элемента с центральной трубкой.

Таблица 3.4 – Журнал экспериментальных данных для проведения эксперимента по аэродинамическому исследованию прямого центростремительного массообменного элемента

	$Q_k \frac{м^3}{ч}$									
r/R	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$v, \frac{м}{с}$										
α										
$t_г, ^\circ C$	20									
$P_a, кПа$	101,3									

Вывод:

1. Провести экспериментальные опыты разрабатываемых образцов согласно разработанным методикам эксперимента.
2. Провести анализ экспериментальных данных и установить графоаналитическую зависимость результатов эксперимента.
3. На основе анализа полученных данных выявить наиболее перспективный образец для дальнейшей проработки в промышленных условиях.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Определение эффективной модели центробежного массообменного устройства

В первом эксперименте испытывались три конструкции первой группы центробежного массообменного устройства на основе центробежного сепаратора [31] Ду50. Эскизы этих моделей представлены на рисунках 3.1 а, б, в.

В ходе испытаний образцов велось отслеживание количества уноса жидкости из элемента, пневматическое сопротивление элемента, а так же фиксировалась высота полёта капель и высота водяного кольца, движущегося по питающей трубке.

Дынные, полученные в ходе проведения экспериментов представлены в виде графических зависимостей. [39]

На первом этапе определялась зависимость процента отсепарированной жидкости η от фактора скорости потока F_c .

Для модели 1 такой график представлен на рисунке 4.1.

При расходе воды к воздуху 3/5 наблюдается сильный унос на минимальных расходах воздуха. Это связано с тем, что при посадке центральной трубки на 14 мм от дна элемента такое минимальное количество жидкости плохо формирует центробежный поток смеси, что приводит к разрыву потока и крупные капли жидкости уносятся через верх элемента. При увеличении скорости газа поток приобретает центробежный характер и мы наблюдаем за уменьшением капельного уноса до момента, когда конструкция элемента перестает справляться с данной скоростью газа, после чего унос снова увеличивается. Увеличение расхода жидкости позволяет уменьшить разрыв газожидкостного потока, что приводило к более стабильной работе элемента.

Для модели 2 такой график представлен на рисунке 4.2

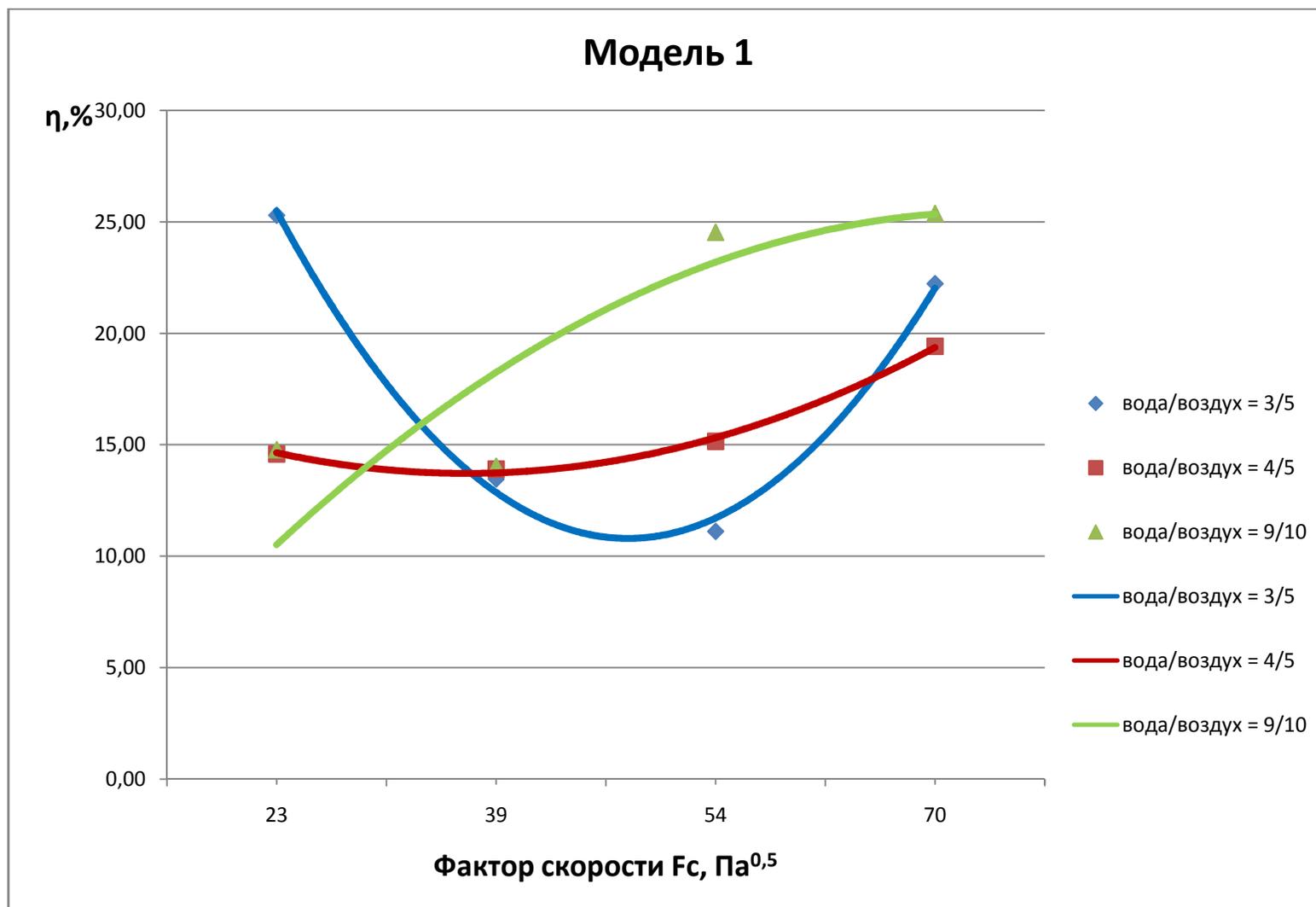
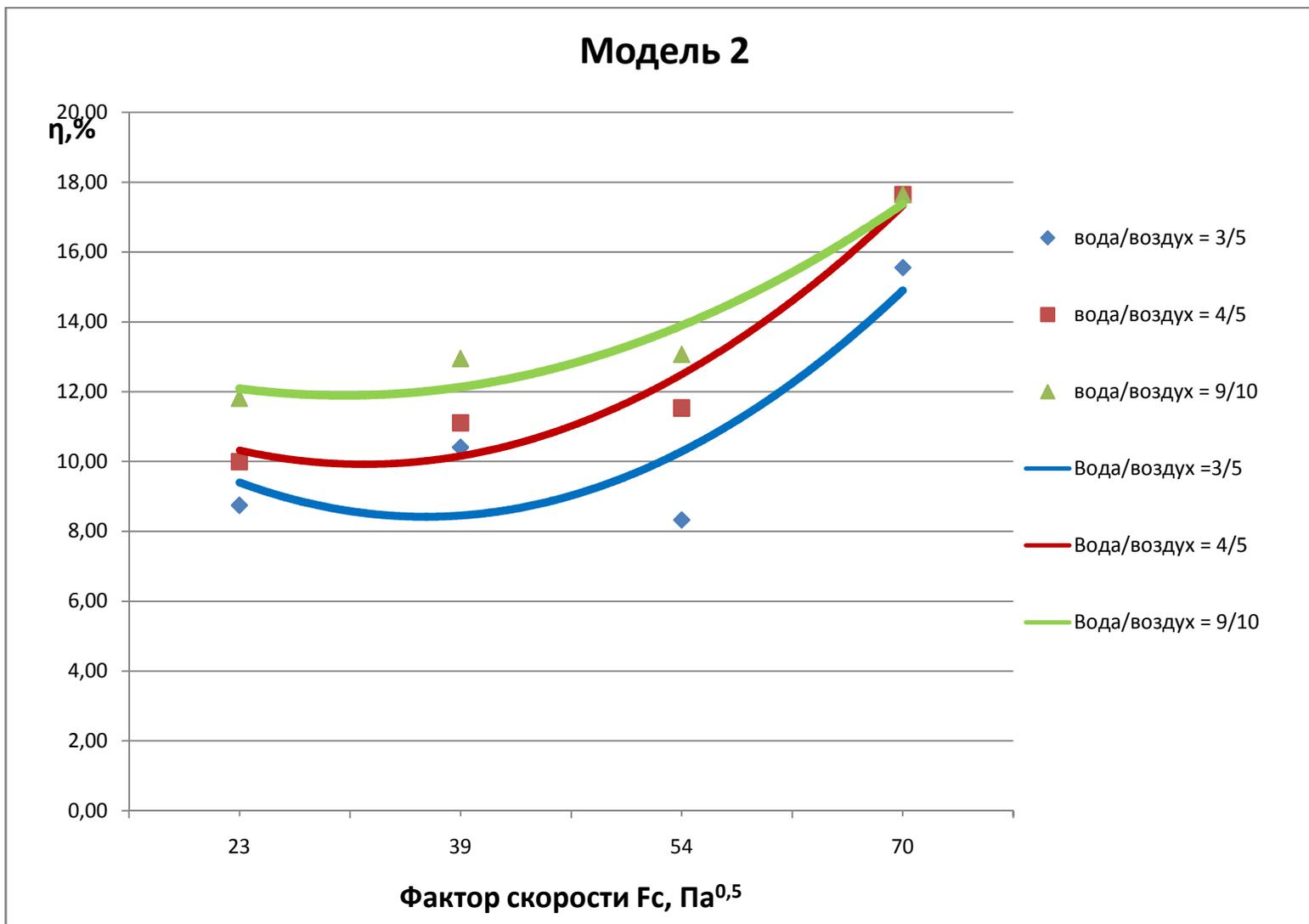


Рисунок 4.1 - График зависимости процента унесенной жидкости (коэффициента уноса) от фактора скорости потока модели 1



зависимости процента унесенной жидкости (коэффициента уноса) от фактора скорости потока модели 2

Рисунок 4.2 - График

В модели 2 высота посадки трубки подобрана оптимально, что наглядно показывают графики в виде плавного увеличения уноса жидкости по мере роста расхода газа на различных объемах жидкости.

Для модели 3 такой график представлен на рисунке 4.3

Аналогичные графики строятся для зависимости разницы давления ΔP от фактора скорости потока F .

Для модели 1 такой график представлен на рисунке 4.4.

Для модели 2 такой график представлен на рисунке 4.5.

Для модели 3 такой график представлен на рисунке 4.6.

Результаты проведенных экспериментов показали, что эффективность разработанных конструкций не соответствует требуемой, унос аэрозолей с воздухом составлял более 10 % от поступающей жидкости. Визуально наблюдался большой унос пленочной жидкости по поверхности питающей трубки. Так же, за счет увеличения потока жидкости её объем не успевал проходить через зазор верхнего кольца и частично срезался, уходя в атмосферу.

По итогам эксперимента наиболее эффективной моделью первой группы элементов оказалась модель №2. Высота посадки трубки от дна элемента в ней является оптимальной для данной группы элементов и работа этой модели наиболее стабильна.

Модели №4 и №5, составляющие вторую группу, учитывали недостатки предыдущих и так же участвовали в эксперименте.

Результаты испытания моделей 4, 5, показаны в виде графиков на рисунках 4.7 – 4.10.

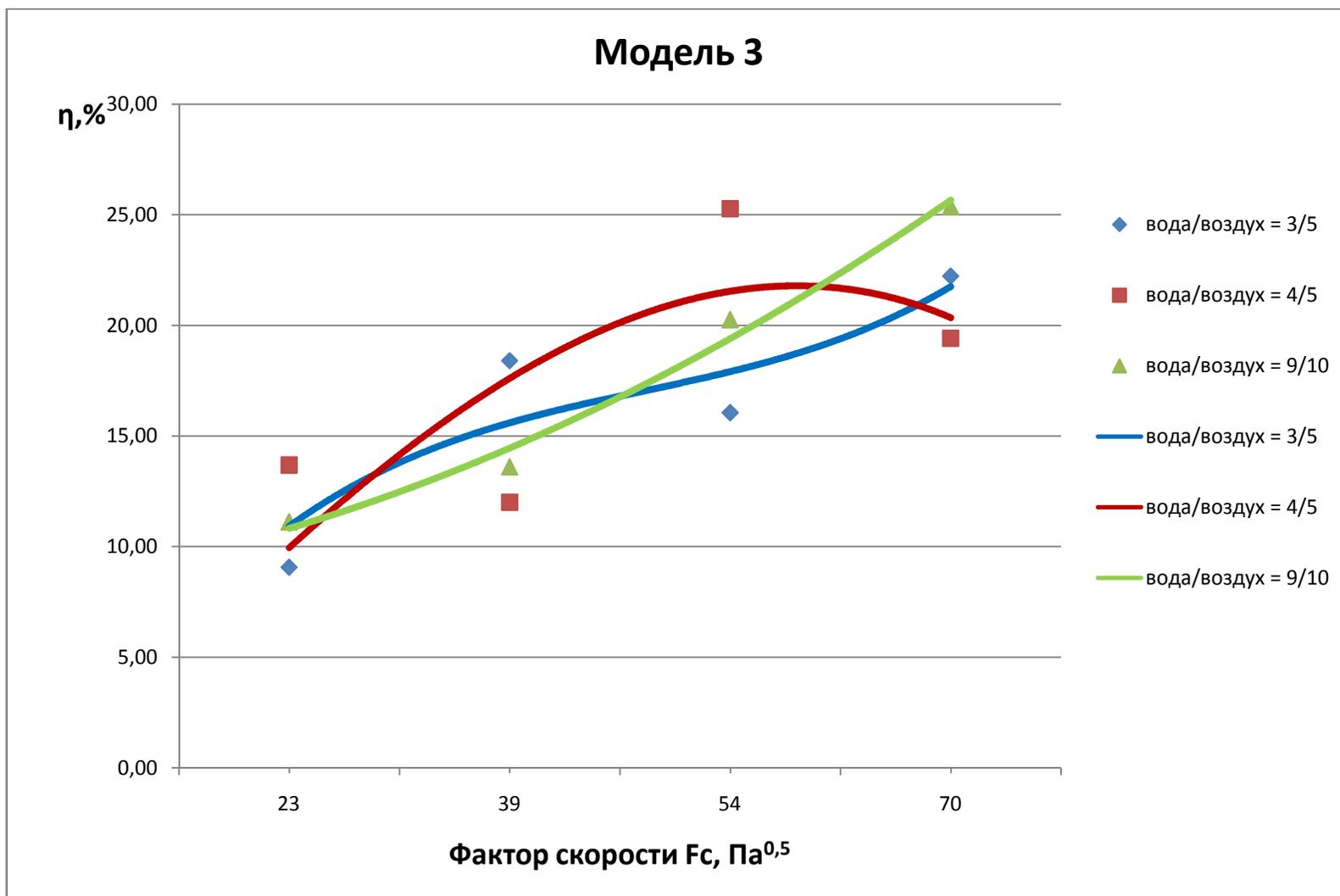


Рисунок 4.3 - График зависимости процента унесенной жидкости (коэффициента уноса) от фактора скорости потока модели 3

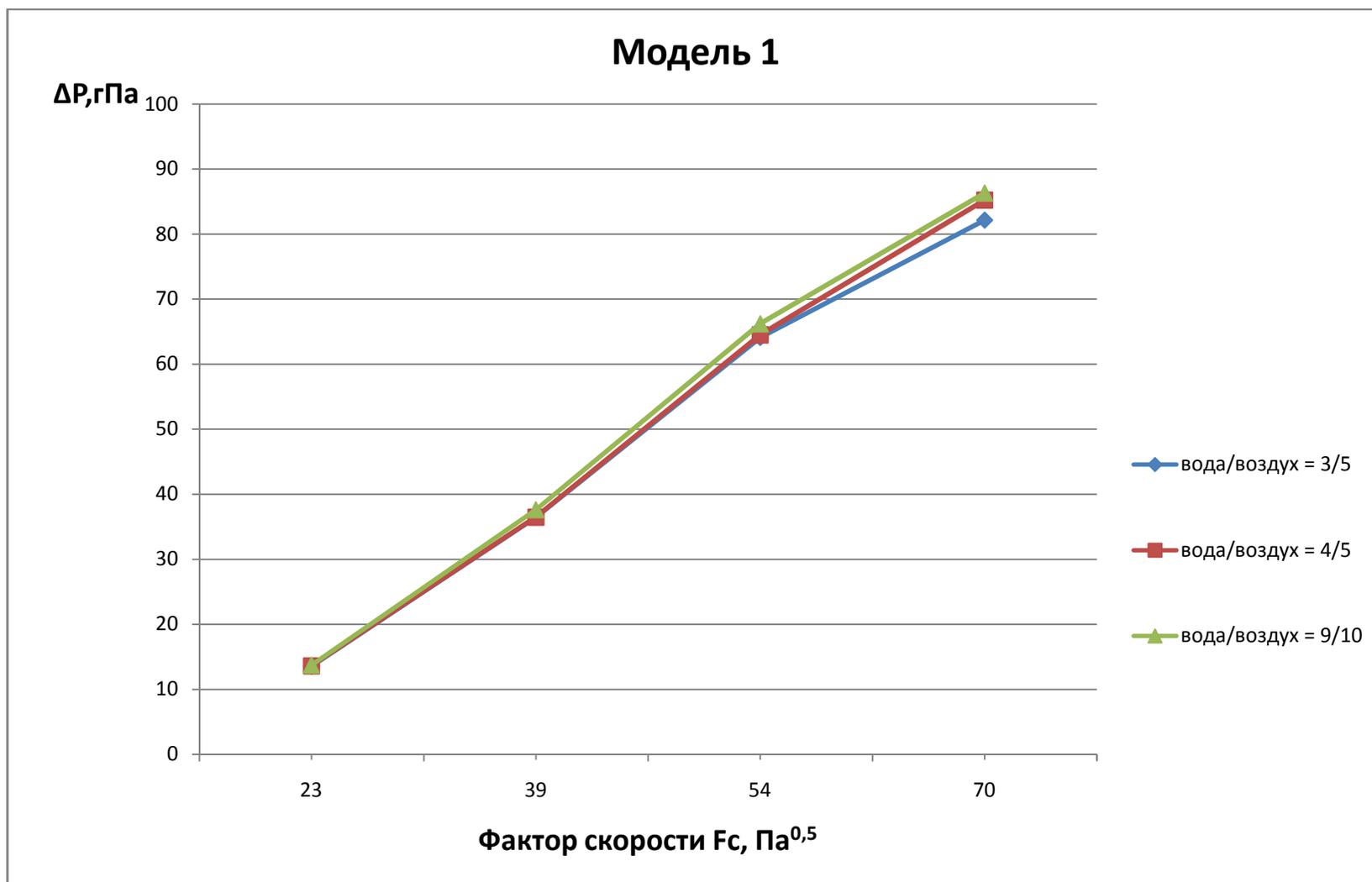


Рисунок 4.4 - График зависимости гидравлического сопротивления ΔP от фактора скорости потока F_c модели 1

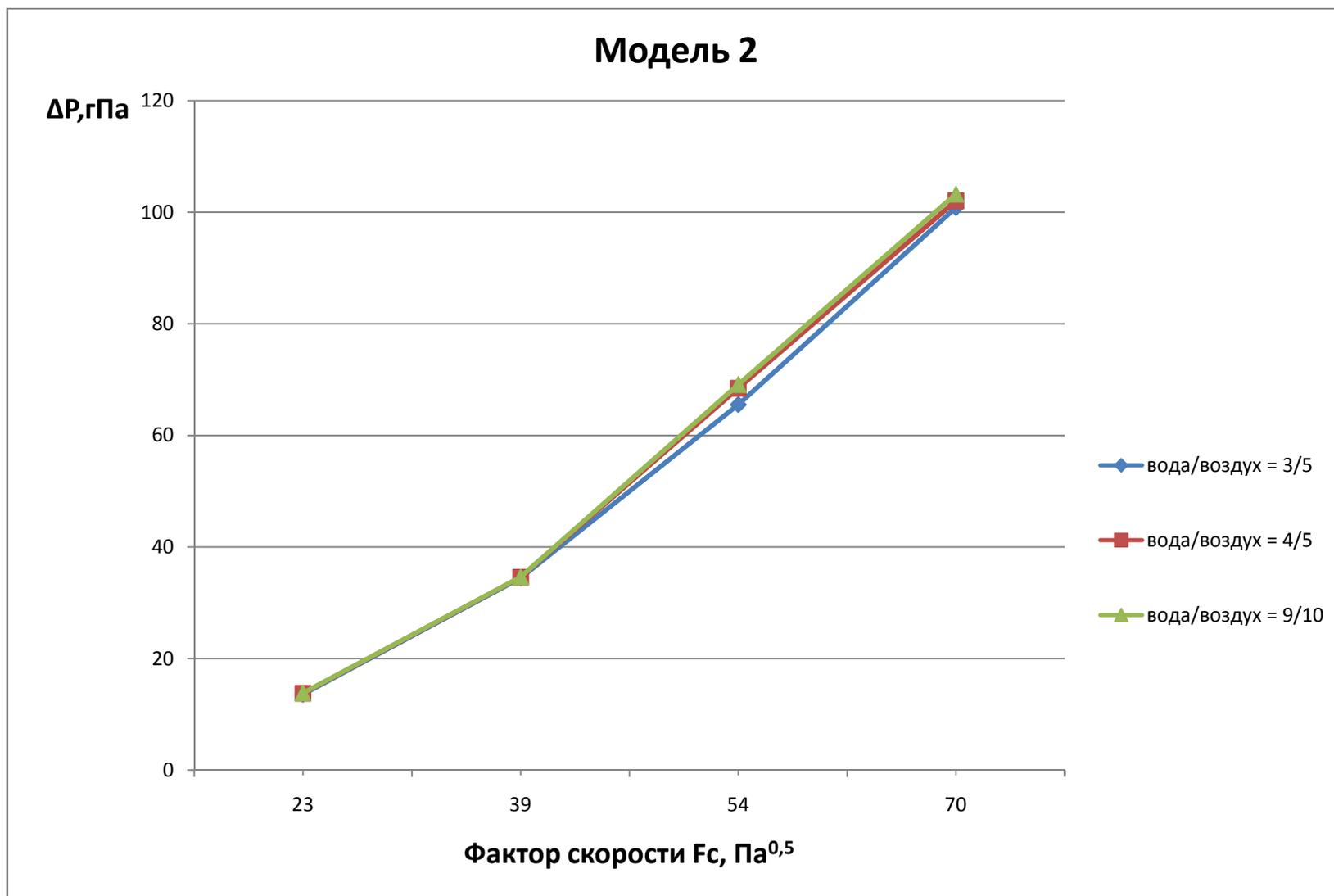


Рисунок 4.5 - График зависимости гидравлического сопротивления ΔP от фактора скорости потока F_c модели 2

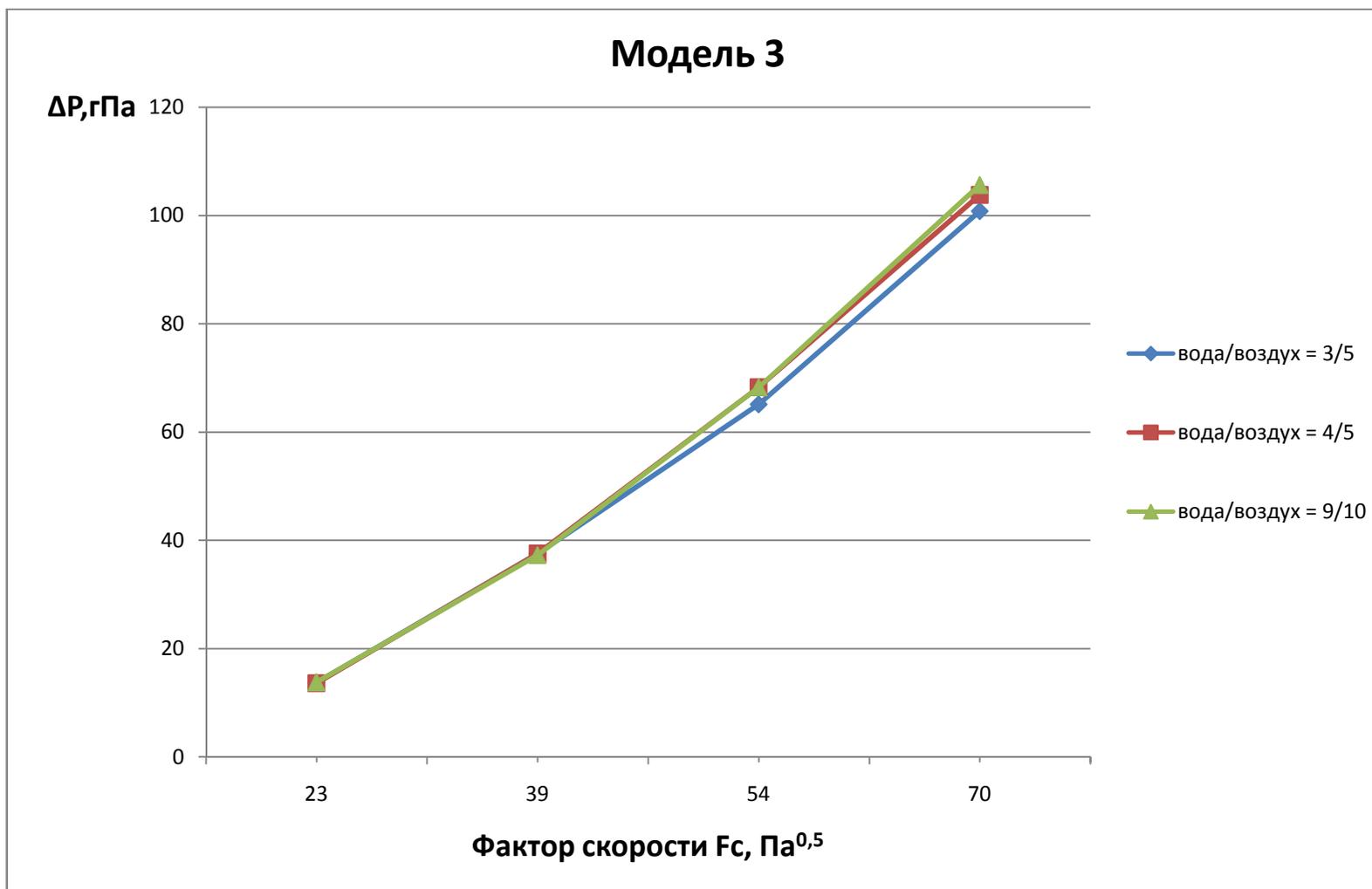


Рисунок 4.6 - График зависимости гидравлического сопротивления ΔP от фактора скорости потока F_c модели 3

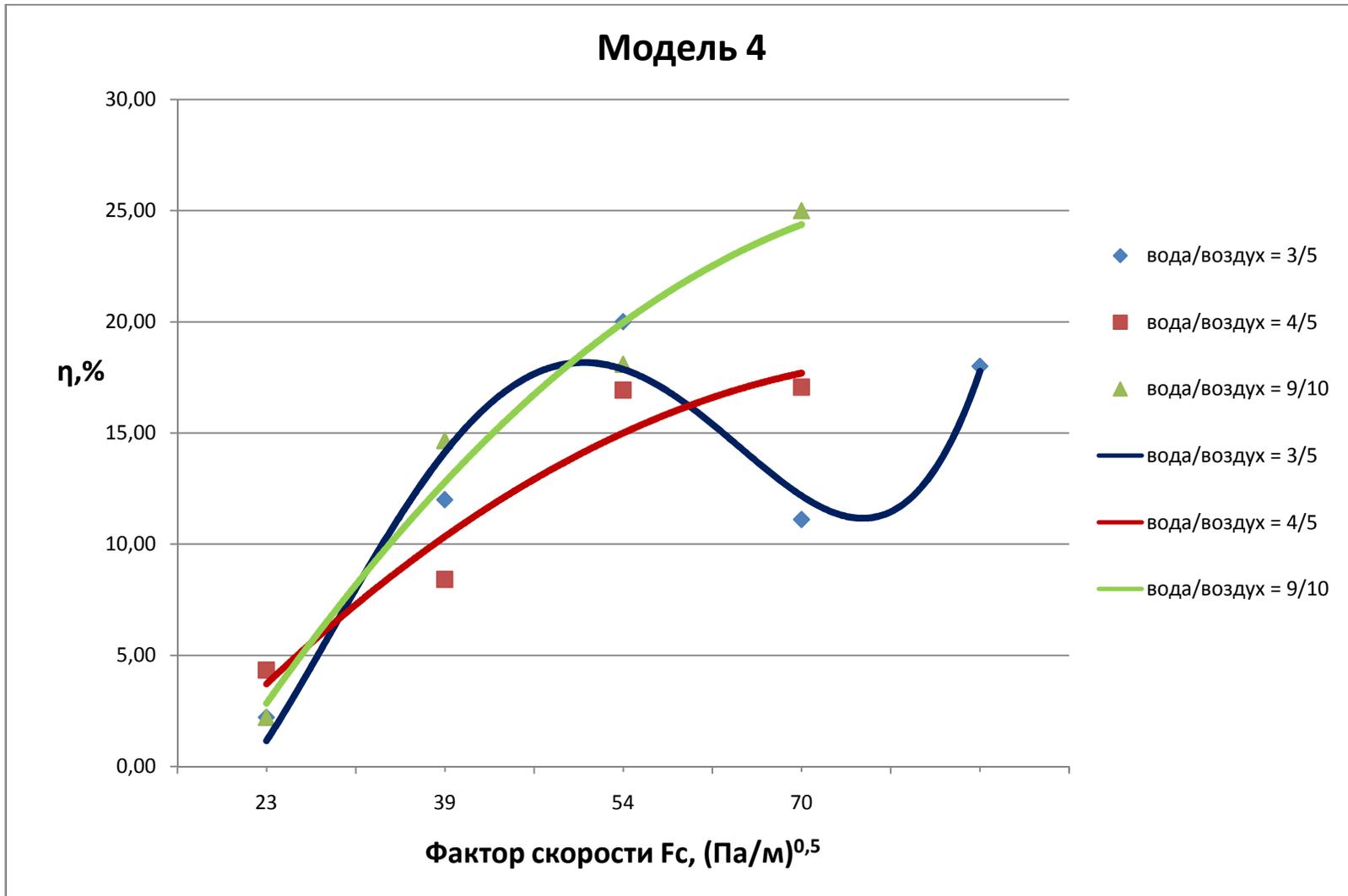


Рисунок 4.7 - График зависимости процента унесенной жидкости от фактора скорости потока модели 4.

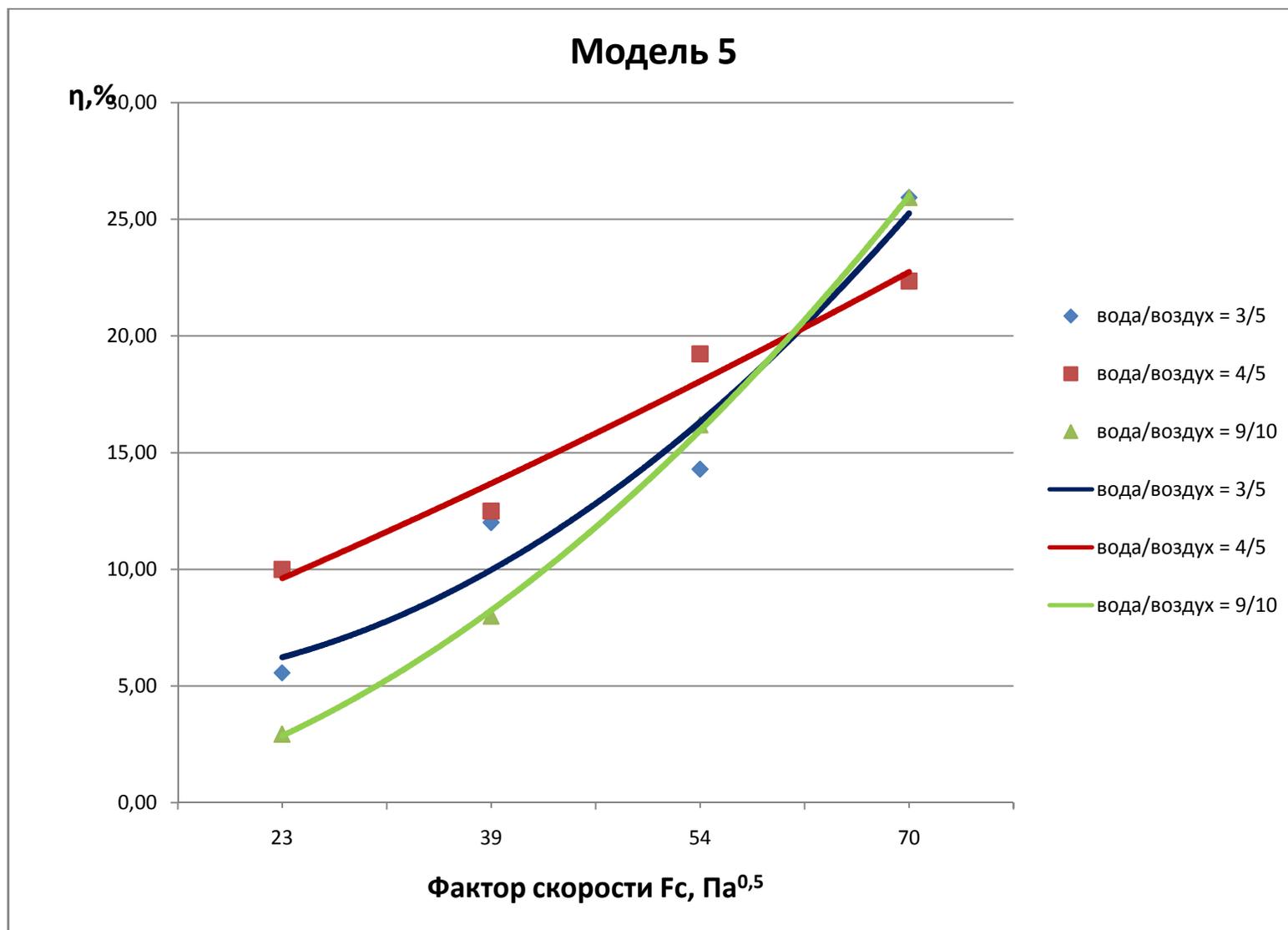


Рисунок 4.8 - График зависимости процента унесенной жидкости от фактора скорости потока модели 5.

На расходе 3/5 наблюдается падение показателей уноса жидкости по достижении его пика. Это показывает оптимальный диапазон работы данной модели по нагрузке как газа, так и жидкости. В дальнейшем, при увеличении скорости газа показатель уноса продолжил расти.

За счет наличия гидрозатвора в модели 5 показатели уноса различаются не значительно, поскольку весь поток формируется еще в стакане и его структура и характер движения схож при любом выбранном соотношении воды и воздуха.

Все видимые отличия обусловлены лишь скоростью потока за счет увеличения скорости газа.

Аналогичные графики строятся для зависимости разницы давления ΔP от фактора скорости потока F_c .

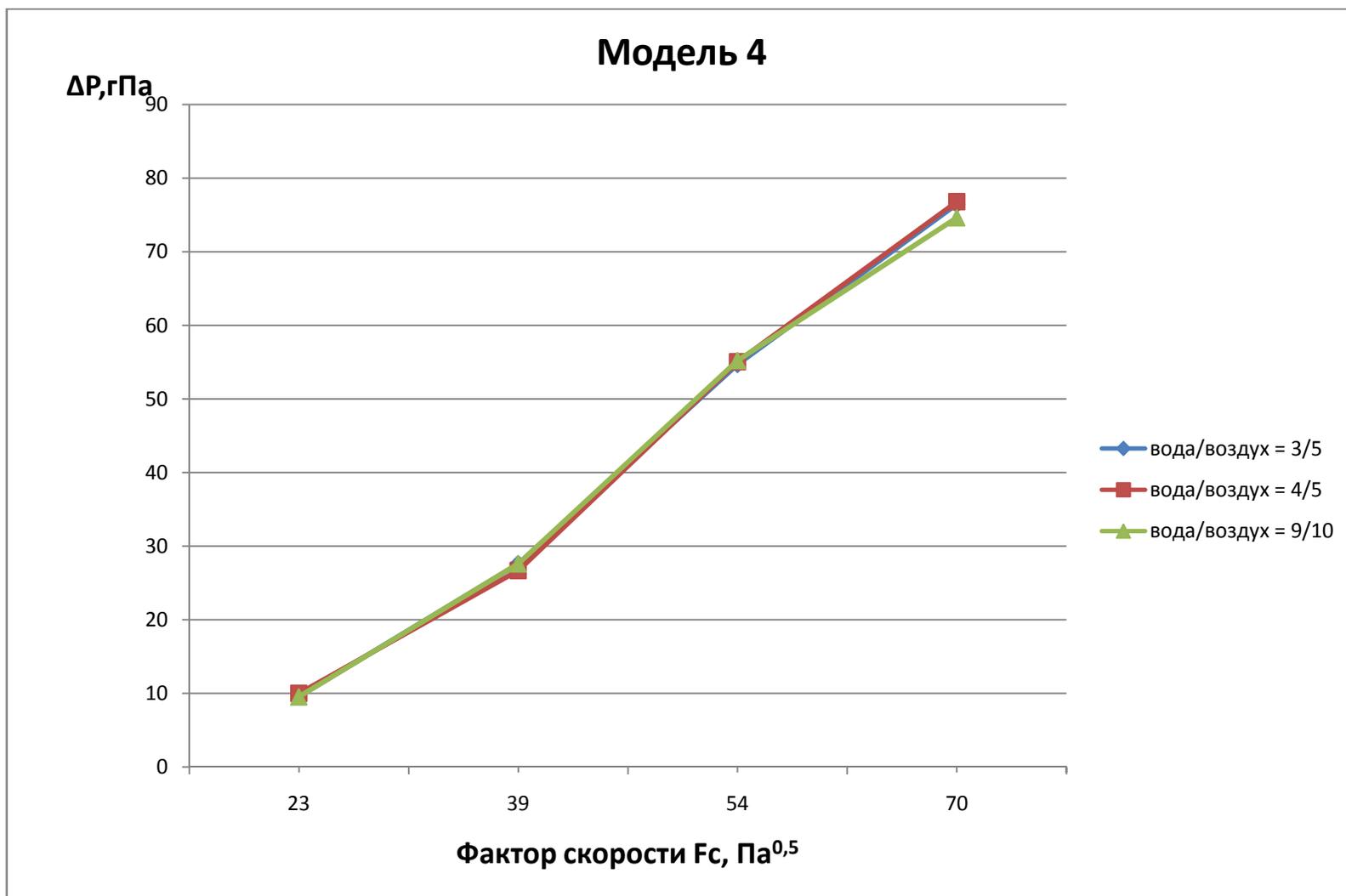


Рисунок 4.9 - График зависимости разницы давления ΔP от фактора скорости потока F_c модели 4

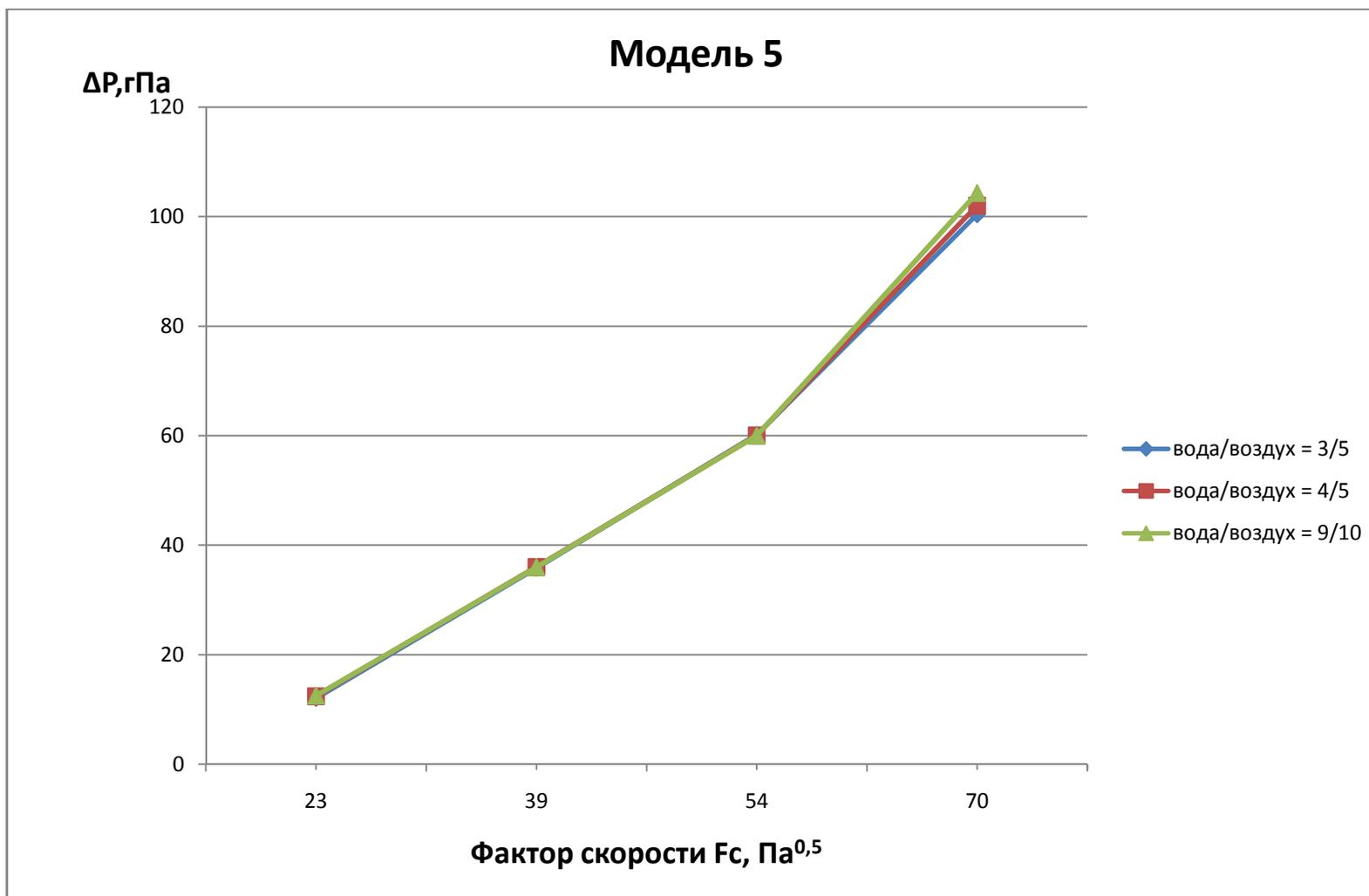


Рисунок 4.10 - График зависимости разницы давления ΔP от фактора скорости потока F_c модели 5

Результаты проведенных экспериментов показали, что разработанные модели 4, 5 показали результаты лучше, чем изначальные варианты 1, 2, 3. Наиболее эффективной оказалась модель 4. Унос жидкости с газом составляет до 17 % в диапазоне фактора скорости 23 – 70 (Па)^{0,5} и расходе жидкости от 1 до 315 кг/ч. Тангенциальные щели на обечайке и увеличенный зазор между каплесьемником и проточной частью дали положительный эффект на всех трех образцах и снизили унос жидкости. Основным преимуществом моделей 4 и 5 стал более лучший массообмен. Модель 4 отличается от других наиболее высокой дисперсностью жидкости (развитой контактной поверхностью). За счет боковых отверстий на питающей трубке обеспечивается эффективное дробление жидкости и наилучшее распределение её по объему модели, что улучшает показатели массообмена [41, 42].

В модели 5 массообмен начинался еще в стакане и, тем самым повышая её эффективность, но увеличивая гидравлическое сопротивление.

По итогам испытаний был проведен сравнительный анализ наиболее удачных моделей для выявления дальнейшего пути развития. Таковыми являются модели 2, 4, 5. Модели оценивались по каждому критерию в диапазоне шкалы от 1 до 10. Результаты сравнения приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1 - Результаты анализа моделей центробежного массообменного устройства Ду50

	Модель 2	Модель 4	Модель 5
Эффективность массообмена	7	10	10
Гидравлическое сопротивление	8	10	8
Простота изготовления	10	8	7
Стоимость изготовления	10	9	8
Итого	35	37	33

Таким образом, приоритет дальнейшего исследования был отдан модели №4.

Данные исследования выявили преимущества и недостатки всех предложенных вариантов конструкций и определили пути дальнейшего развития. Основной проблемой всех элементов является унос жидкости из элемента по поверхности питающей трубки. Устранение потока пленочной жидкости по питающей трубке позволит добиться высокой эффективности массообмена в модели 4.

Основной проблемой послужило большое количество жидкости, поступающей в элемент. Поскольку конструкционно решить эту задачу для Ду50 оказалось невозможным, было принято решение для масштабирования модели 4 до размеров центробежного массообменного устройства Ду100.

Конструкция Ду100 модель 4.1 на основе образца 4 представлена на рисунке 4.11 и 4.12.

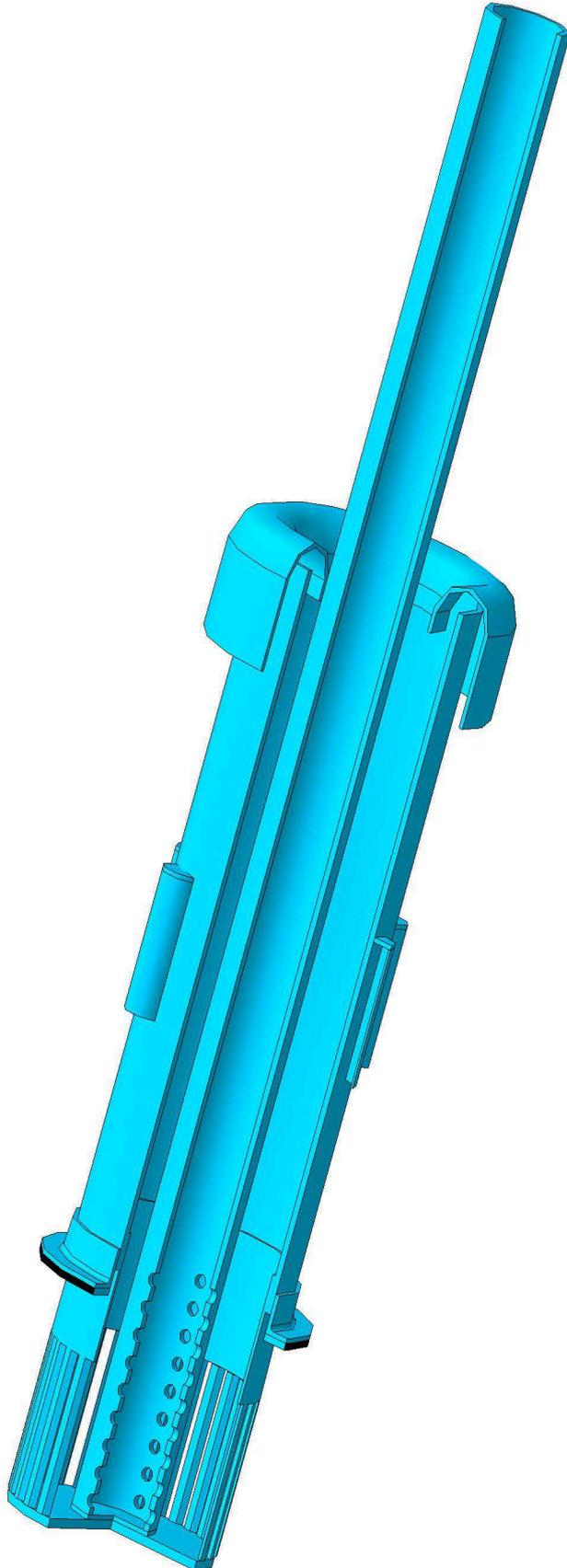


Рисунок 4.11– Центробежное массообменное устройство Ду100, модель 4.1

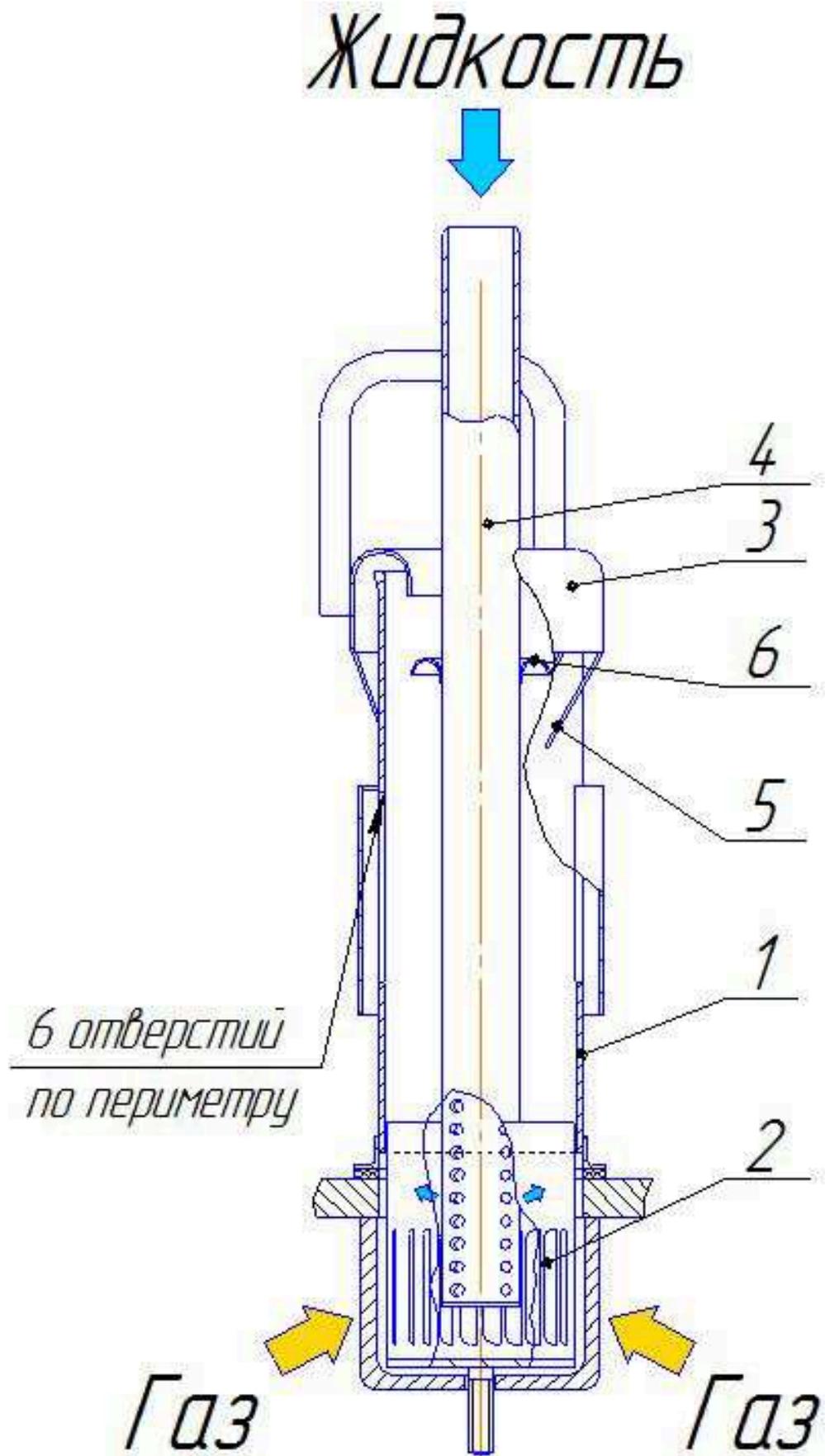


Рисунок 4.12– схема работы центробежного массообменного устройства
Ду100, модель 4.1

Модели 4.1 так же состоит из корпуса 1, завихрителя 2, каплеотбойника 3, питающей трубки 4 и каплеотсекателя 5. В ходе пробных испытаний данного элемента был выявлен недостаток прошлых моделей, а именно унос струйной жидкости по центральной трубке. Убрать этот недостаток помог установленный на модели преградитель жидкости 6. Он представляет собой подобие каплеотбойника 3, установленное на центральную трубку. Таким образом, жидкость, двигающаяся по центральной трубке, отбивается на стенку центробежного элемента и сепарируется.

Проведенные испытания на этой модели показали её высокую эффективность. Результаты испытания модели 4.1 показаны в виде графиков на рисунке 4.13 – 4.14.

Данные графики наглядно показывают эффективность принятых конструктивных решений. При максимальных расходах жидкости в 690 л/ч капельный унос составляет менее 5%, что при такой высокой производительности является допустимым.

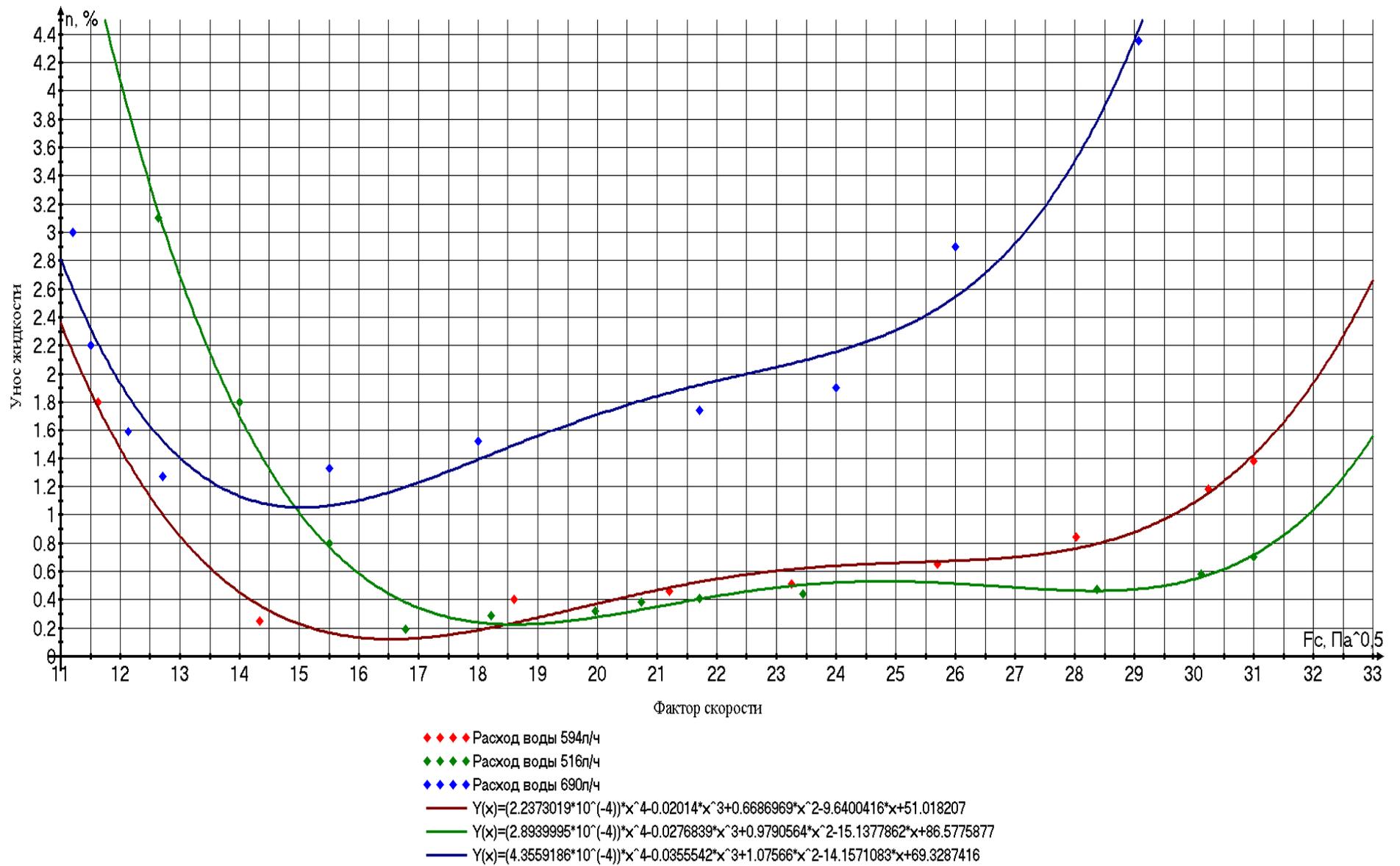


Рисунок 4.13- График работы элемента 4.1 Ду100 при различных расходах жидкости

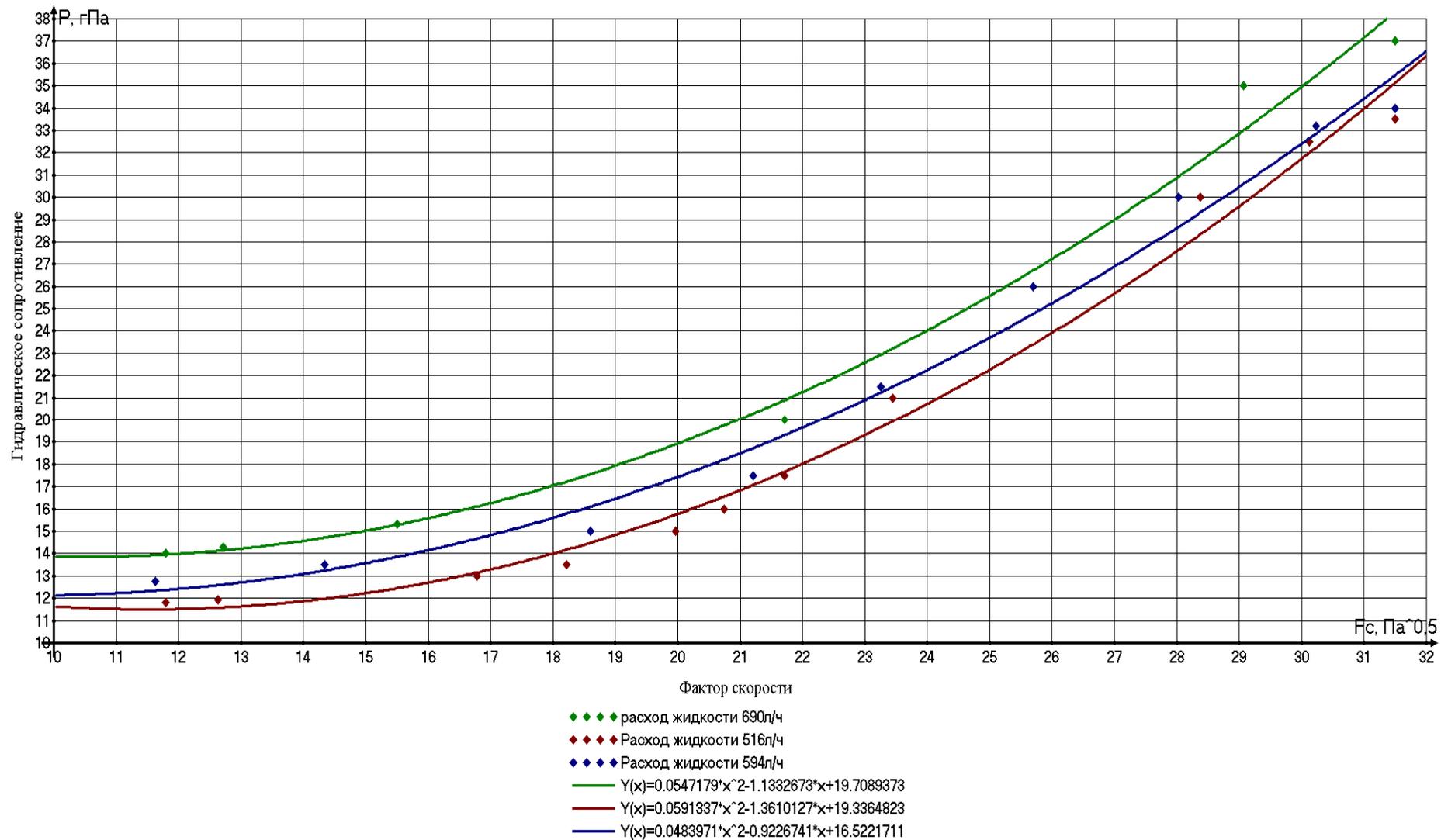


Рисунок 4.14 - График зависимости гидравлического сопротивления ΔP от фактора скорости потока F_c модели 4.1 Ду100

Модель 5 так же была увеличена до размеров Ду100, трехмерная модель которой показана в приложении Г, и была исследована с целью получения данных, которые в дальнейшем можно использовать для совершенствования ЦМЭ.

В приложении Д изображен График работы элемента 5 Ду100 при различных расходах жидкости.

В приложении Е изображен график зависимости разницы давления ΔP от фактора скорости потока F_c модели 5 Ду100.

С результатами эксперимента был проведен регрессионный анализ для определения коэффициентов в уравнении зависимости уноса жидкости и роста давления от фактора скорости потока.

Для расчета гидравлического сопротивления элемента автором была предложена параболическая зависимость гидравлического давления ΔP от фактора скорости F_c следующего вида, подтверждаемая экспериментальным путём:

$$\Delta P = A \cdot F_c^2 - B \cdot F_c + C,$$

где A , B , C – коэффициенты, определяемые для каждого элемента экспериментальным путем.

Для элемента 4.1 значения этих коэффициентов представлены в таблице 4.2

Таблица 4.2. Значения коэффициентов гидравлического сопротивления

	A	B	C
Расход 690л/ч	0,054	1,13	19,71
Расход 594л/ч	0,048	0,92	16,52
Расход 516л/ч	0,059	1,36	19,33

Одной из важнейших характеристик массообменного устройства является капельный унос жидкости. Автором установлена полиномиальная зависимость уноса жидкости η (%) от фактора скорости F_c

$$\eta = A_1 \cdot F_c^4 - B_1 \cdot F_c^3 + C_1 \cdot F_c^2 - D_1 \cdot F_c + E_1,$$

где A_1, B_1, C_1, D_1, E_1 – коэффициенты, определяемые для каждого элемента экспериментальным путем.

Значения коэффициентов жидкостного уноса приведены в таблице 4.3

Таблица 4.3. - Значения коэффициентов жидкостного уноса

Расход, л/ч	A_1	B_1	C_1	D_1	E_1
690	0,00043	0,03554	1,07566	14,1571	69,32874
594	0,00022	0,02014	0,66869	9,64	51,0182
516	0,00029	0,02768	0,97905	15,1377	86,57758

4.2 Результаты аэродинамических исследований

Анализ экспериментальных данных по распределению скоростей и давлений при течении закрученного потока [43] в трубах для разных способов начальной закрутки позволяет выделить два участка с качественно различной структурой потока [4, 5]. Первый из них располагается около завихрителя и длина его для различных условий составляет от 0,5 до 3 диаметров трубы. Распределение составляющих скоростей, статического и полного давления в этой области определяется способом закрутки, геометрическими размерами завихрителя.

Характерной особенностью второго участка является то, что характер распределения скоростей на этом участке не зависит от способа закрутки потока, определяется только ее интенсивностью. Здесь течение носит подобный характер, а характерные локальные и интегральные параметры потока

определяются численным значением параметра кинематического подобия внутренних закрученных потоков. На некоторой длине в потоке исчезают особенности, обусловленные закруткой, и он переходит в осевое течение с профилем скорости стабилизированного потока. Данную величину можно рассматривать как длину гидродинамического начального участка закрученного потока.

Важными характеристиками внутренних закрученных течений являются радиус зоны обратных течений, зависящий от интенсивности закрутки потока, максимальные значения составляющих скоростей, угол закрутки потока на стенке канала, азимутальная и радиальная неравномерность поля скоростей.

Однако при скоростях газа выше критических возможны такие условия работы, когда сорванная жидкость необязательно уносится из аппарата. Она может осесть на пленку или будет уловлена кольцевой щелью отводящего устройства. Это приведет к некоторому увеличению гидравлического сопротивления ЦМЭ, но не ухудшит эффективность его работы, повысив пропускную способность.

В результате проведения экспериментов получены:

- зависимости скорости потока от относительного радиуса;
- зависимость угла закрутки потока от относительного радиуса для каждого из сечений

Из рисунков 4.15 (а-в) и 4.16 (а-в) видно, что профили скоростей и углов закрутки потока носят подобный характер.

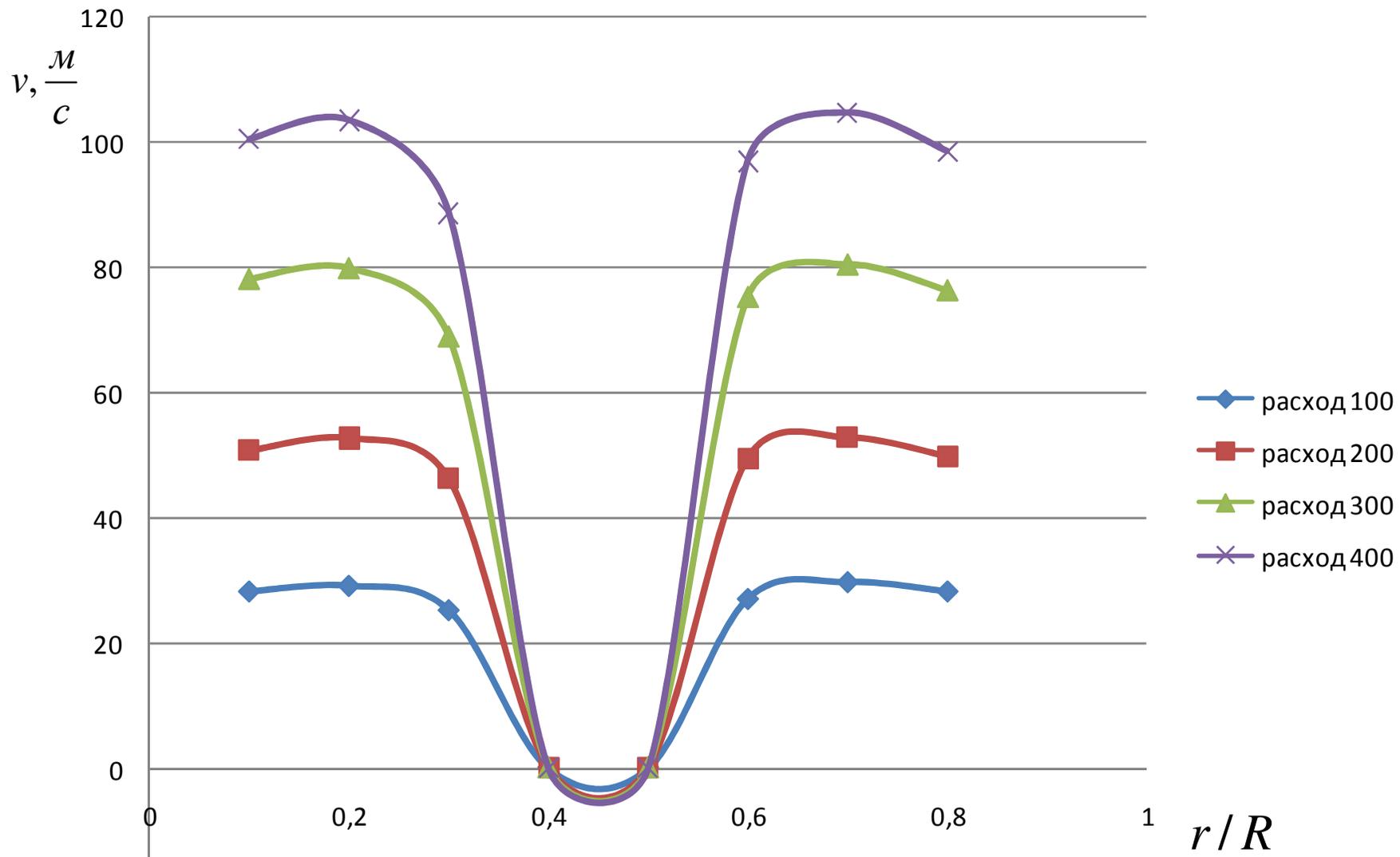


Рисунок 4.15а – Зависимость скорости потока от относительного радиуса при различных расходах для ЦМЭ № 4.1 (точка 1)

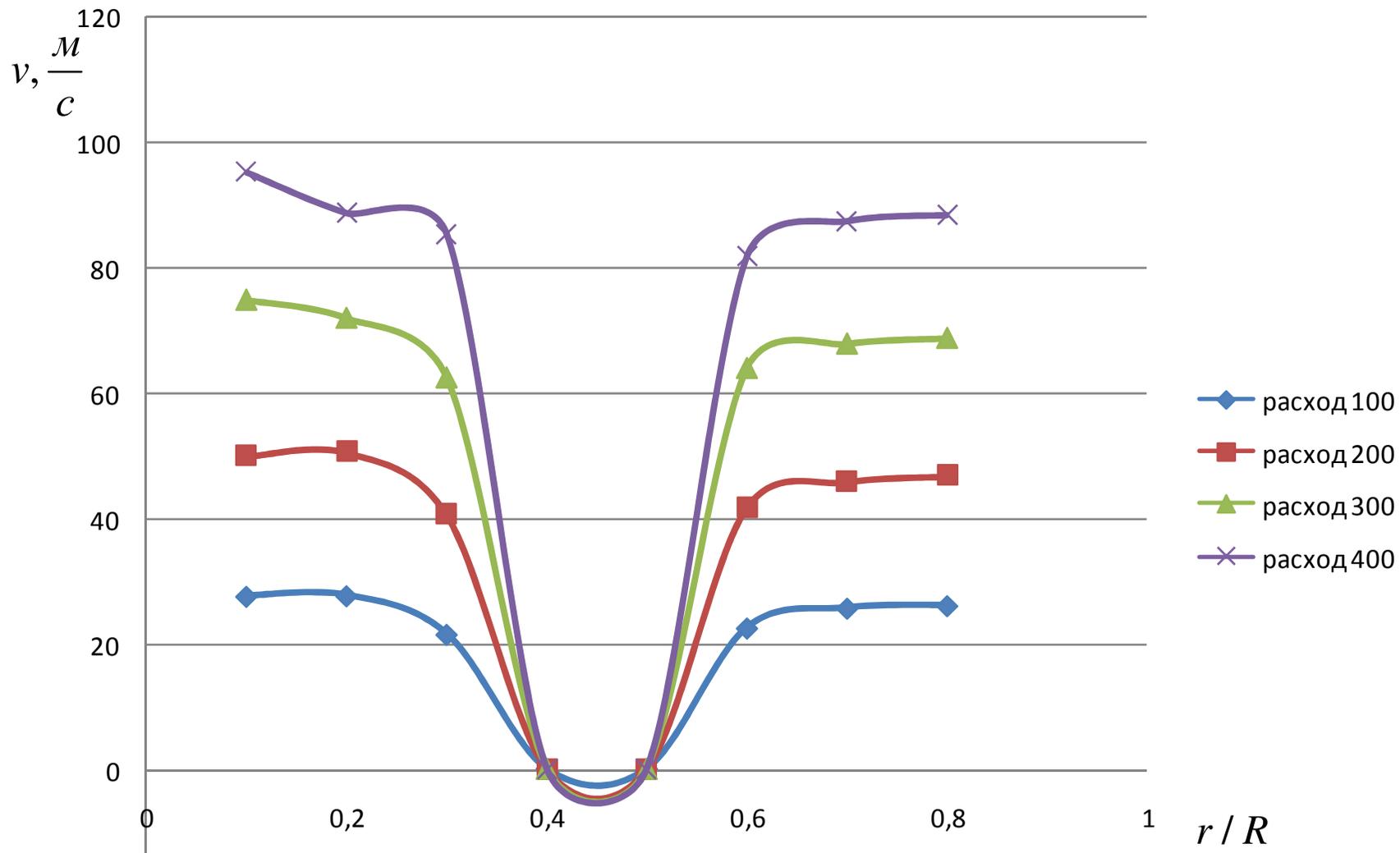


Рисунок 4.156 – Зависимость скорости потока от относительного радиуса при различных расходах для ЦМЭ № 4.1 (точка 2)

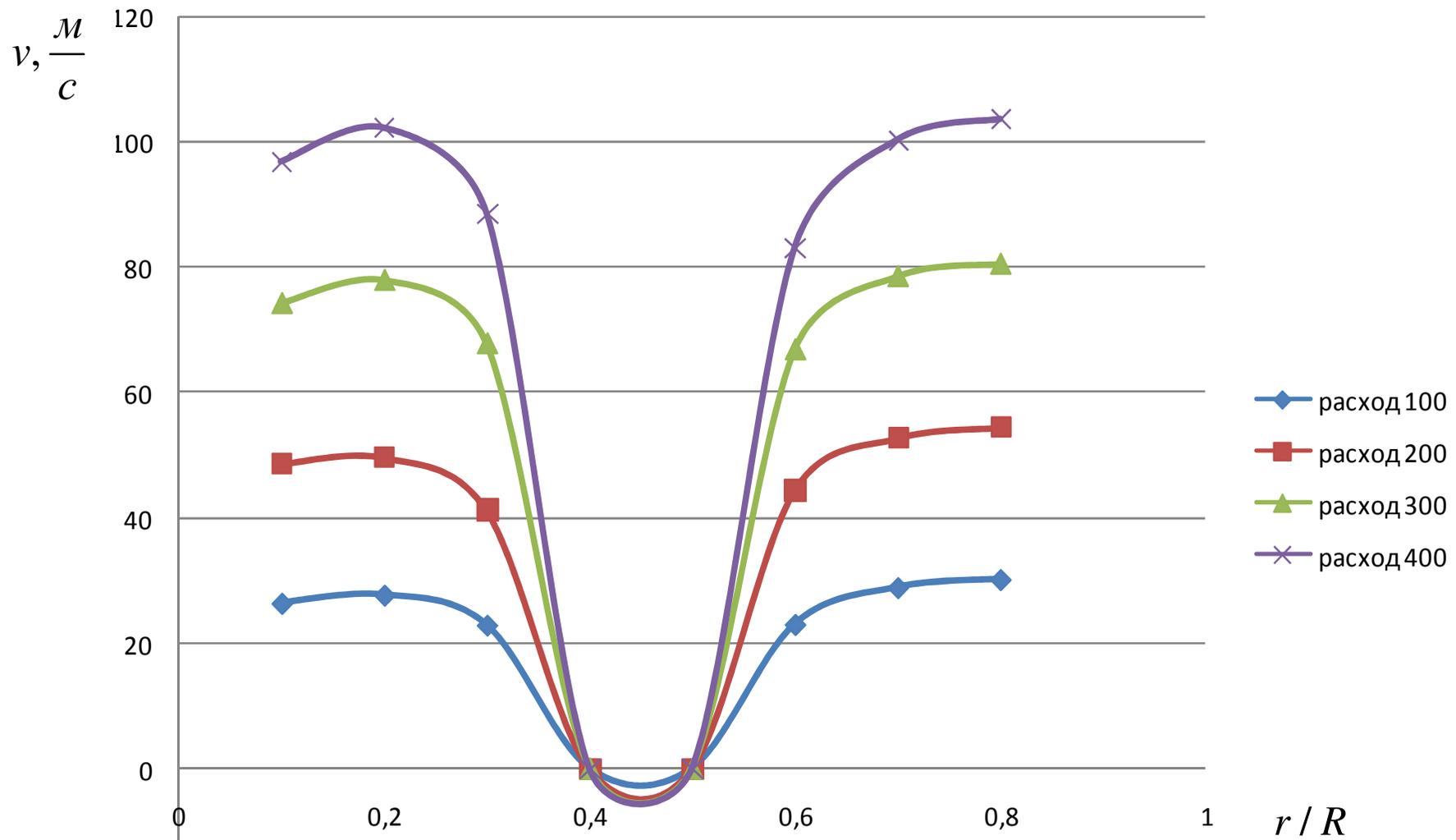


Рисунок 4.15в – Зависимость скорости потока от относительного радиуса при различных расходах для ЦМЭ № 4.1 (точка 3)

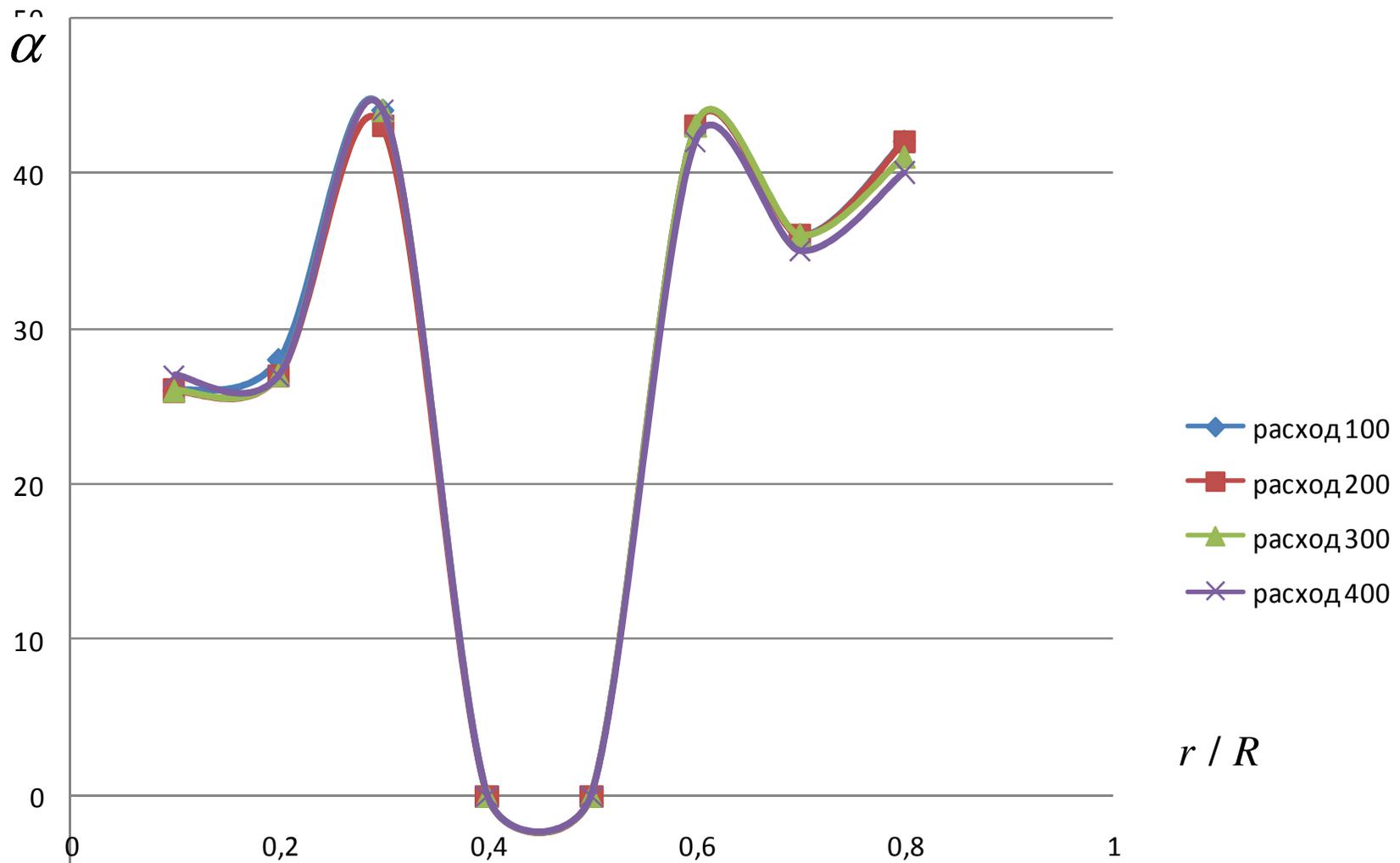


Рисунок 4.16а – Зависимость угла закрутки потока от расхода по сечению центробежного массообменного элемента № 4.1 (точка 1)

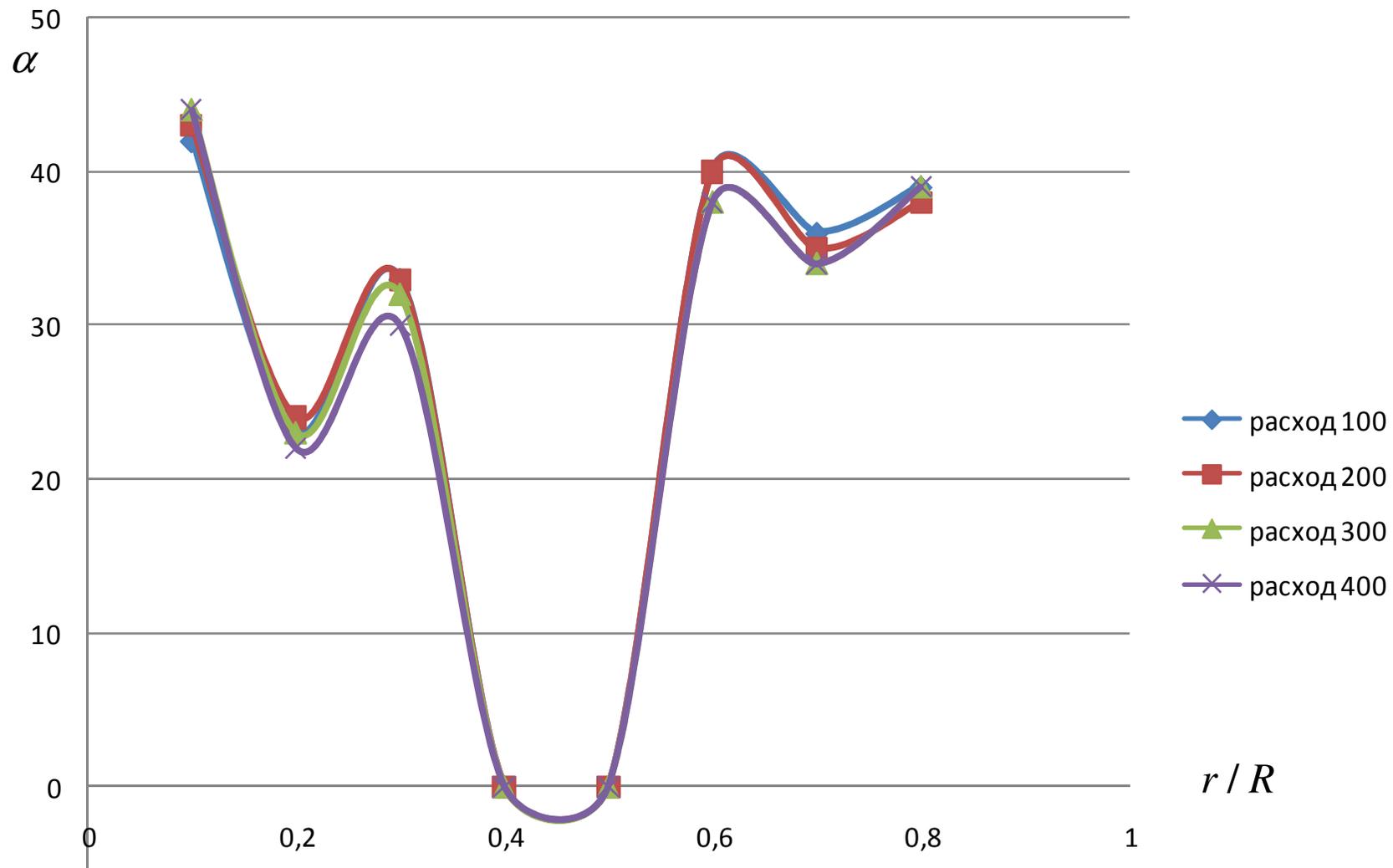


Рисунок 4.16б – Зависимость угла закрутки потока от расхода по сечению центробежного массообменного элемента № 4.1 (точка 2)

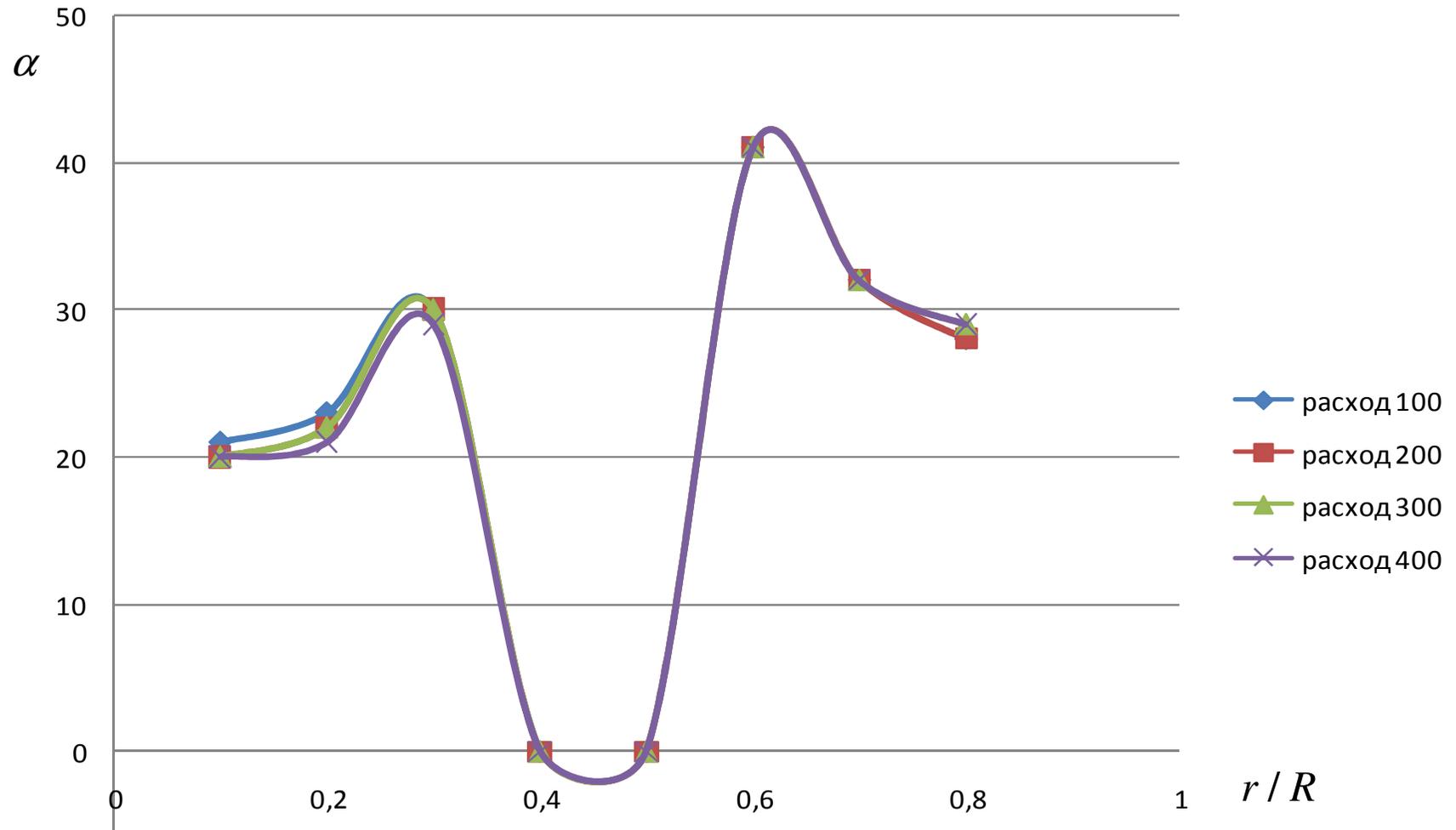


Рисунок 4.16в – Зависимость угла закрутки потока от расхода по сечению центробежного массообменного элемента № 4.1 (точка 3)

От степени закрутки, типа завихрителя и формы устья сопла зависят важнейшие гидродинамические характеристики струи. От закрутки зависит неравномерность распределения скорости по сечению сопла.

Выводы:

На основании проведенных исследований автором получены коэффициенты жидкостного уноса и гидравлического сопротивления для разрабатываемого типа центробежного массообменного устройства.

Из графиков, представленных на рисунках 4.15 – 4.16 видно, что профиль скорости потока для исследуемых центробежных массообменных элементов имеет *M*-образную форму, характерную для сильно закрученных потоков, что косвенно указывает на возможность создания на базе исследованных образцов высокопроизводительных, эффективных центробежных сепарационно-массообменных элементов.

Дальнейшее повышение закрутки ведет к тому, что появляется зона обратного течения, которая либо смыкается вниз по течению либо расширяется настолько, что струя далее вниз по течению не смыкается.

5 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе теоретических и экспериментальных исследований центробежного массообменного элемента модели 4.1 автором был разработан промышленный образец, чертеж которого представлен на рисунке 5.1.

Данная модель нашла применение в «опытно-экспериментальной установке по обработке технологии переработки углеводородного сырья в п. Афипский»

Для расчета оптимальной производительности установки автор использовал руководящий материал для расчета сепарационных центробежных элементов и сепараторов.

Опытно-экспериментальная установка включает основные технологические блоки:

- блок переработки углеводородного сырья;
- совместный каталитический блок Цеокат-Аркон;
- блок нагрева теплоносителя.

В состав установки также входят следующие вспомогательные блоки:

- азотный блок;
- блок оборотного водоснабжения.

Располагается опытно-экспериментальная установка в п. Афипский Краснодарского края (бывшая производственная база ОАО «НИПИгазпереработка»)

Годовой фонд работы опытной установки – 3000 часов.

Блок переработки углеводородного сырья предназначен для разделения нефти на фракции по температурам кипения. Выработка целевых продуктов осуществляется за счет фракционирования сырья в ректификационной колонне К-101.

Целевыми продуктами блока переработки являются:

- пентан-додекановая фракция (компонент экологически чистого высокооктанового бензина);

- керосино-газойлевая фракция (компонент экологически чистого дизельного топлива);
- фракция тяжелых углеводородов (компонент котельного топлива)

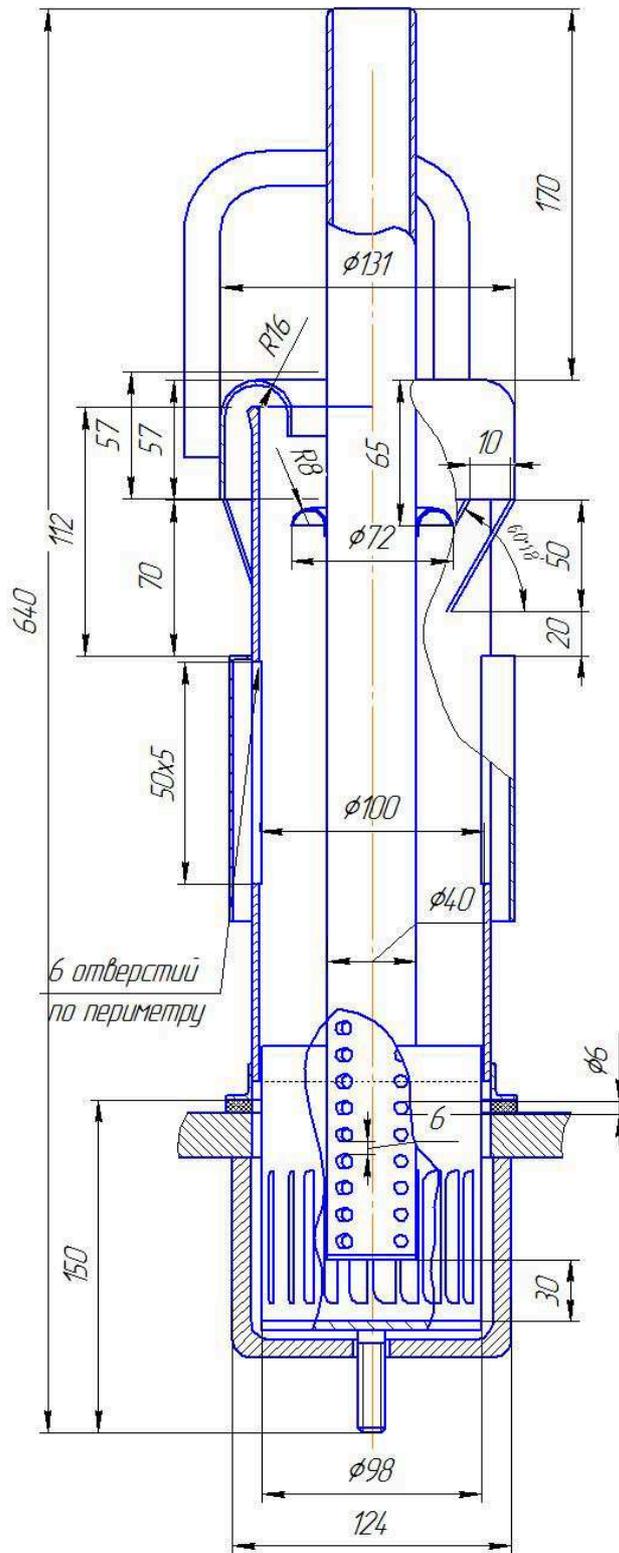


Рисунок 5.1. Промышленный образец центробежного массообменного устройства.

В настоящее время блок работает с производительностью 3 м³/ч.

Опытно-экспериментальная установка в п. Афипский не имеет постоянно-го источника сырья, поэтому при работе промышленного образца центробежного массообменного элемента рассматривалась работа блока на сырье легкого состава (Астраханский газоконденсат) и тяжелого (усредненный состав нефтяного сырья, на котором установка работала по факту). Фракционные составы легкого и тяжелого сырья представлены в таблице 5.1.

В качестве товарной продукции на блоке переработки углеводородного сырья вырабатываются пентан-додекановая (ТУ 0251-003-00148300-99), керосино-газойле-вая (ТУ 0251-004-00148300-99) и фракция тяжелых углеводородов (ТУ 0252-015-00148300-2005). Фракционный состав пентан-додекановой фракции представлен в таблице 5.2, керосино-газойлевой - в таблице 5.3, фракции тяжелых углеводородов - в таблице 5.4.

Таблица 5.1 -Фракционный состав сырья

Выход, % об.	Температура, °С	
	Легкое сырье	Тяжелое сырье
НК (1)	15	57
10	63	122
20	98	160
30	136	207
40	161	256
50	184	297
60	211	334
70	249	368
80	289	415
90	351	487
КК (96,5)	407	561

Таблица 5.2 -Фракционный состав пентан-додекановой фракции

Выход, % об.	Температура, °С	
	Легкое сырье	Тяжелое сырье
НК(1)	9	35
10	51	69
20	61	95
30	77	104
40	86	111
50	99	118
60	113	124
70	127	132
80	138	140
90	149	152
КК (98)	161	161

Таблица 5.3 -Фракционный состав керосино-газойлевой фракции

Выход, % об.	Температура, °С	
	Легкое сырье	Тяжелое сырье
НК(1)	162	173
10	198	211
20	206	228
30	214	246
40	227	262
50	242	277
60	255	292
70	269	309
80	296	325
90	331	339
КК (96,5)	359	360

Таблица 5.4 -Фракционный состав фракции тяжелых углеводородов

Выход, % об.	Температура, °С	
	Легкое сырье	Тяжелое сырье
НК(1)	166	191
10	338	363
20	372	385
30	393	399
40	406	412
50	419	427
60	433	450
70	451	479
80	481	534
90	530	597
КК (96,5)	562	671

5.1 Принципиальная схема установки

Принципиальная технологическая схема блока переработки углеводородного сырья представлена на рисунке 5.2, расчетные схемы по основному режиму - на рисунках 5.3 и 5.4, а расчетные схемы по пусковому режиму - на рисунках 5.5 и 5.6.

При выполнении научных рекомендаций по дооборудованию опытно-экспериментальной установки рассматривались два режима работы блока переработки углеводородного сырья: основной и пусковой. Пусковой режим отличается от основного отсутствием подачи паров пентан-додекановой фракции в куб колонны К-101.

На расчетных схемах давление приведено в "ате", которое соответствует кгс/см² (изб.); в описании технологической схемы везде указывается избыточное давление.

Сырье на блок переработки углеводородного сырья поступает с температурой 20 °С и атмосферным давлением на прием насоса Н-101/1,2. Насосом Н-101/1,2 сырье подается в рекуперативный теплообменник Т-104, в котором подогревается парами пентан-додекановой фракции с верха колонны К-101 до 80°С. Затем сырье нагревается в рекуперативном теплообменнике Т-101 керосино-газойлевой фракцией из стриппинга колонны К-101 до температуры 114...134 °С и подается в термодегидратор Р-101 для отделения воды. Для лучшего обезвоживания сырья в термодегидраторе на прием насоса Н-101/1,2 подается деэмульгатор насосом Н-103 из емкости Е-109. Обезвоженное сырье после термодегидратора Р-101 последовательно нагревается в рекуперативном теплообменнике Т-102, а затем в печи П-101 и подается в колонну К-101. В теплообменнике Т-102 сырье нагревается фракцией тяжелых углеводородов из куба колонны К-101. После печи П-101 сырье подается в колонну К-101 с температурой 300...350 °С и давлением 0,60 кгс/см².

Колонна К-101 состоит из основной секции и встроенной отпарной стриппинг- секции, образованной продольной перегородкой, прикрепленной к боковым стенкам и днищу колонны. Колонна К-101 предназначена для выработки пентан-додекановой фракции, отбираемой с верха колонны, керосино-газойлевой фракции, отбираемой с низа стриппинг-секции, и фракции тяжелых углеводородов - нижним продуктом основной секции колонны.

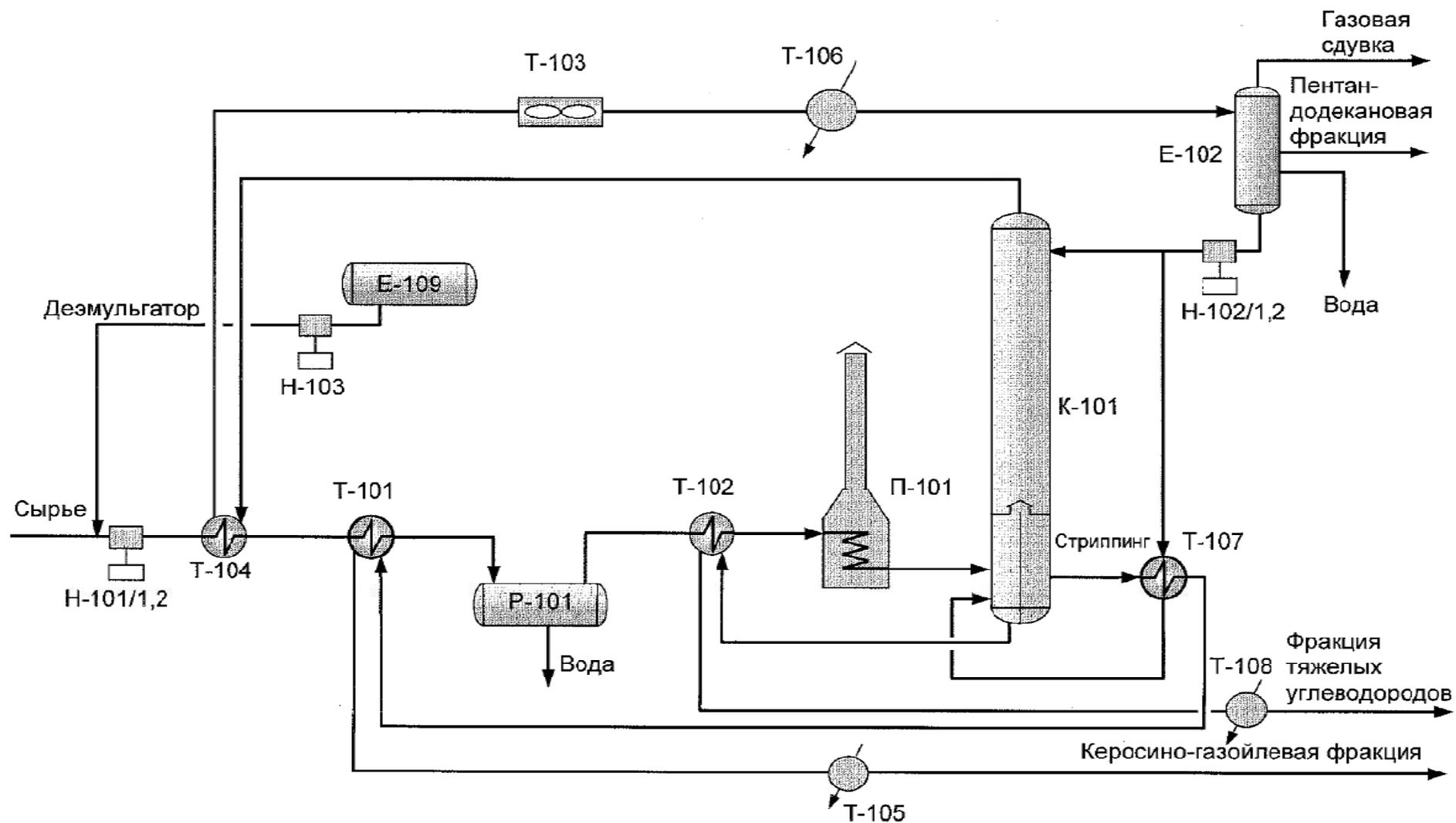


Рисунок 5.2 - Принципиальная технологическая схема блока переработки углеводородного сырья

5.2 Колонное оборудование

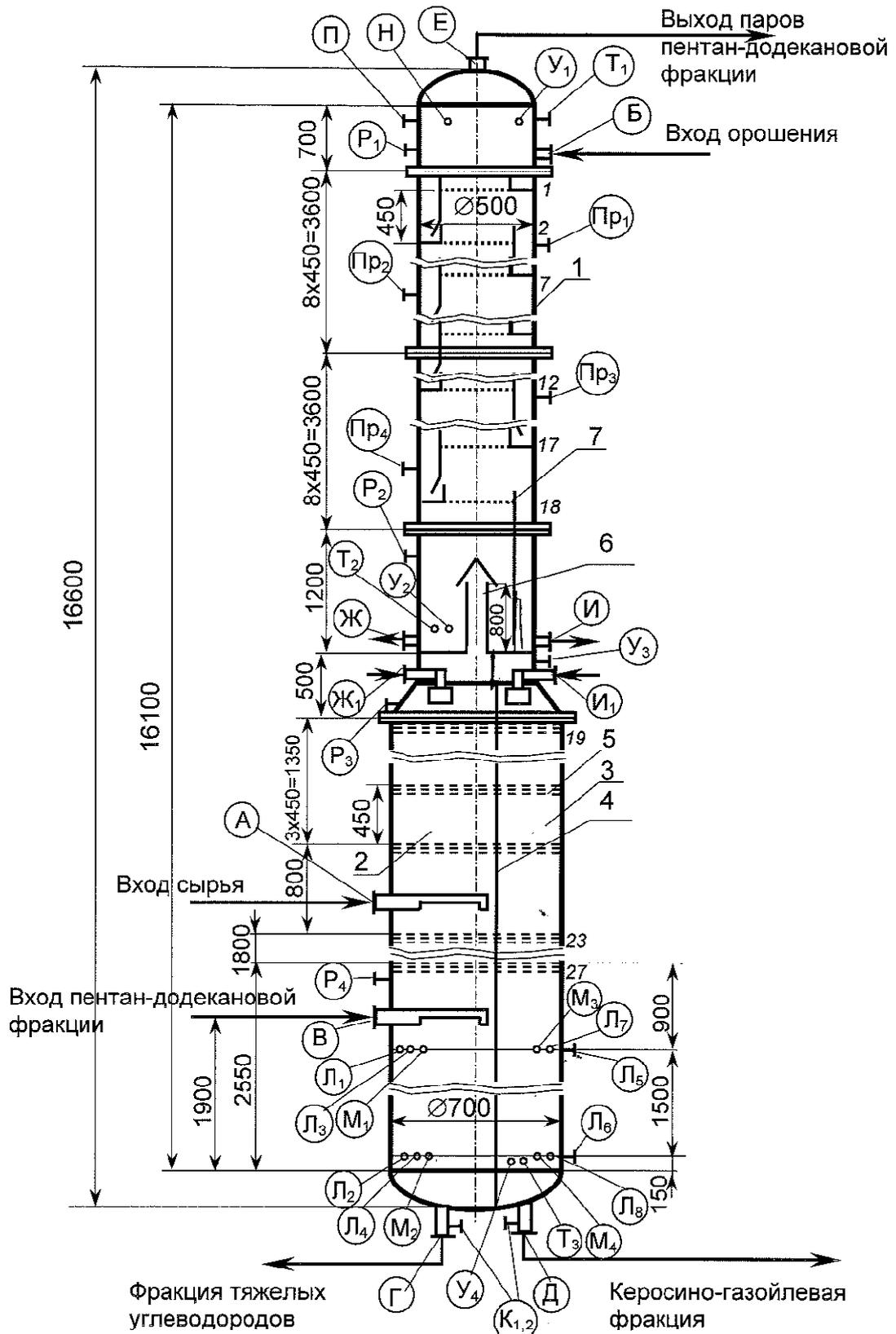
В предлагаемой технологической схеме блока переработки углеводородного сырья используются колонный аппарат - атмосферная колонна К-101 со встроенной стриппинг-секцией, предназначенная для выработки из сырья пентан-додекановой, керосино-газойлевой фракций и фракции тяжелых углеводородов. Пентан-додекановая фракция отбирается с верха колонны, керосино-газойлевая фракция - с низа стриппинг-секции, а нижним продуктом основной секции колонны К-101 является фракция тяжелых углеводородов.

Атмосферная колонна К-101 является сложной колонной конструкции ОАО "НИПИГазпереработка" (патент на изобретение № 2132215 от 27.06.1999 г) и представляет собой вертикальный аппарат переменного сечения диаметром 500/700 мм и высотой обечайки 16100 мм. Корпус колонны состоит из основной секции колонны и отпарной стриппинг-секции (встроенной), образованной продольной перегородкой, прикрепленной к боковым стенкам и днищу колонны. Эскиз аппарата представлен на рисунке 5.3.

Наименование штуцеров колонны К-101 приведено в таблице 5.5.

В укрепляющей части основной секции установлены ситчато-клапанные тарелки конструкции ОАО "НИПИГазпереработка" (свидетельство на полезную модель № 10591) в количестве восемнадцати штук, с межтарельчатым расстоянием 450 мм.

В отгонной секции основной колонны и встроенном стриппинге установлены разработанные центробежные массообменные элементы (патент на полезную модель № 130230, Приложение А), в количестве 40 штук, расположенных на 10 тарелках по 4 штуки на каждой с межтарельчатым расстоянием 600 мм. Позднее данная модель была введена в производство на существующем промышленном объекте, что подтверждено актом внедрения разработки (Приложение В).



- 1 – корпус колонны; 2 – основная секция; 3 – стриппинг секция;
 4 – перегородка между секциями; 5 – пакет трехслойных тарелок;
 6 – патрубок глухой тарелки ($\varnothing 200$ мм); 7 – ситчато-клапанная тарелка

Рисунок 5.3 – Эскиз колонны К-101

Таблица 5.5 -Наименование штуцеров колонны К-101

Обозначение штуцера	Наименование штуцера	Проход условный, D _v , мм	Кол., шт.
А	Вход сырья	100	1
Б	Вход орошения	32	1
В	Вход пентан-додекановой фракции	32	1
Г	Выход фракции тяжелых углеводородов	50	1
Д	Выход керосино-газойлевой фракции	50	1
Е	Выход паров пентан-додекановой фракции	100	1
Ж	Выход жидкости с глухой тарелки	32	1
Ж1	Вход жидкости в К-101	32	1
И	Выход жидкости с глухой тарелки	32	1
И1	Вход жидкости в стриппинг	32	1
К-1,2	Дренаж	32	2
Л1-8	Для датчика уровня	25	8
IVb-4	Для сигнализатора уровня	25	4
Н	Для манометра	25/M20x1,5	1
П	Для датчика давления	25/M20x1,5	1
Р1-4	Для датчика перепада давления	25/M20x1,5	4
Т1-3	Для термометра	25/M27x2	3
У-М	Для датчика температуры	25/M20x1,5	4
Пр1-4	Для отбора проб		4

Конструктивные параметры колонны приведены в таблице 5.6

Таблица 5.6 -Конструктивные параметры аппарата

Наименование параметра	Колонна К-101		Стриппинг К-101 (встроенный)
	верх	низ	
Диаметр аппарата, мм	500	700	300
Тип тарелок	центробежные	Трехслойные провальные	
Число тарелок, шт.	10	4/5	9
Расстояние между тарелками, мм	600	450	
Площадь свободного сечения, м ²	0,196	0,41	0,09
Площадь перелива, м ²	0,02	-	-
Рабочая площадь тарелки, м ²	0,15	0,41	0,09
Диаметр отверстий, мм	90	17,18,19/18,19,20	17,18,19
Высота аппарата, мм	9100/7000		7000
Масса аппарата (ориентировочно), кг	5200		
Примечание - Эквивалентный диаметр.			

Промышленные испытания образца проводились из расчета расхода 594л/ч сырья на один элемент для наиболее точного сравнения показателей с ранее полученными исследованиями.

Сравнительные результаты по уносу жидкого сырья представлены на рисунке 5.4

Аналогичные исследования проводились и для определения гидравлического сопротивления центробежного массообменного элемента в промышленных условиях. Результаты сравнительного исследования приведены на рисунке 5.5.

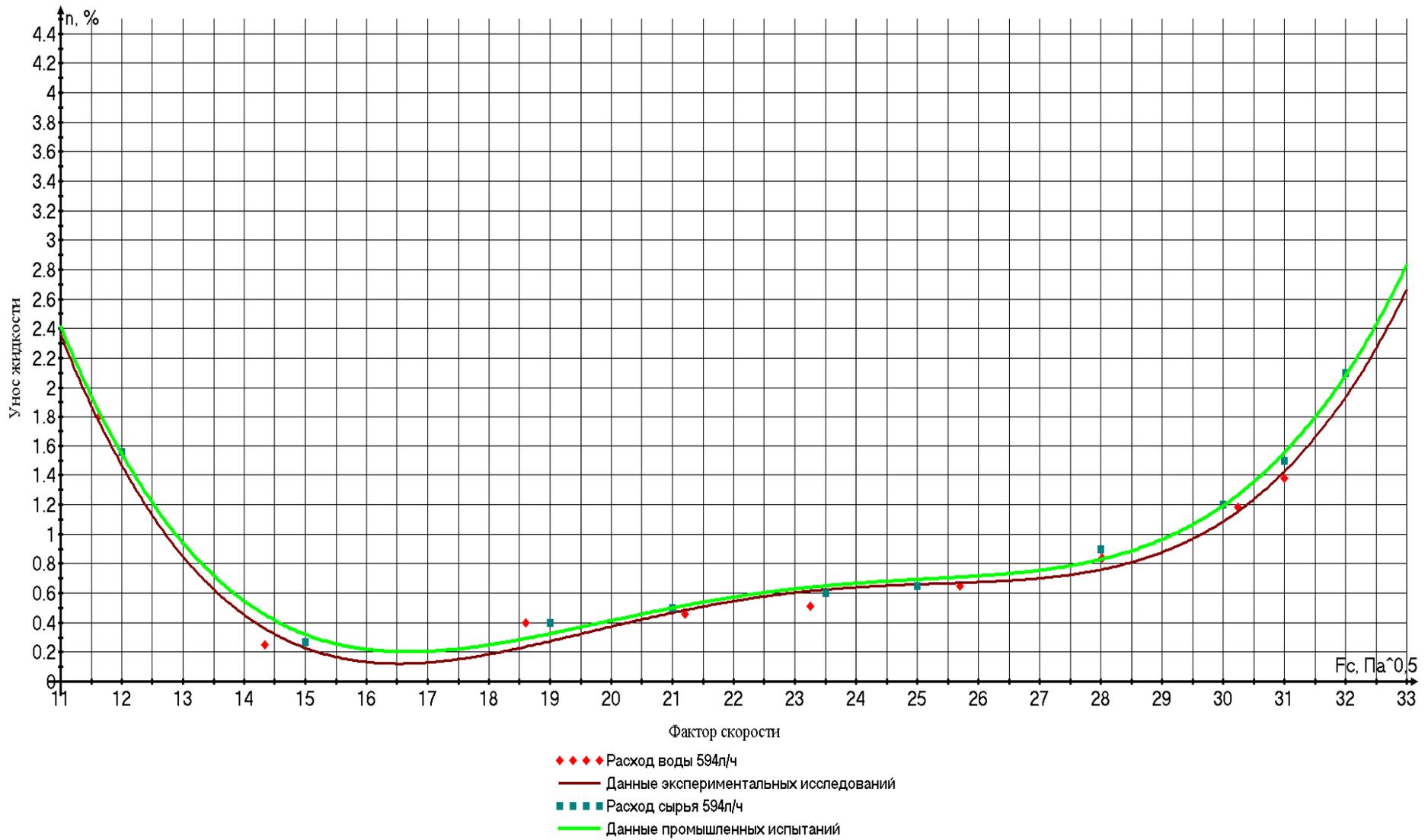


Рисунок 5.4 – Сравнительные результаты промышленных и экспериментальных исследований элемента по количеству уноса жидкости

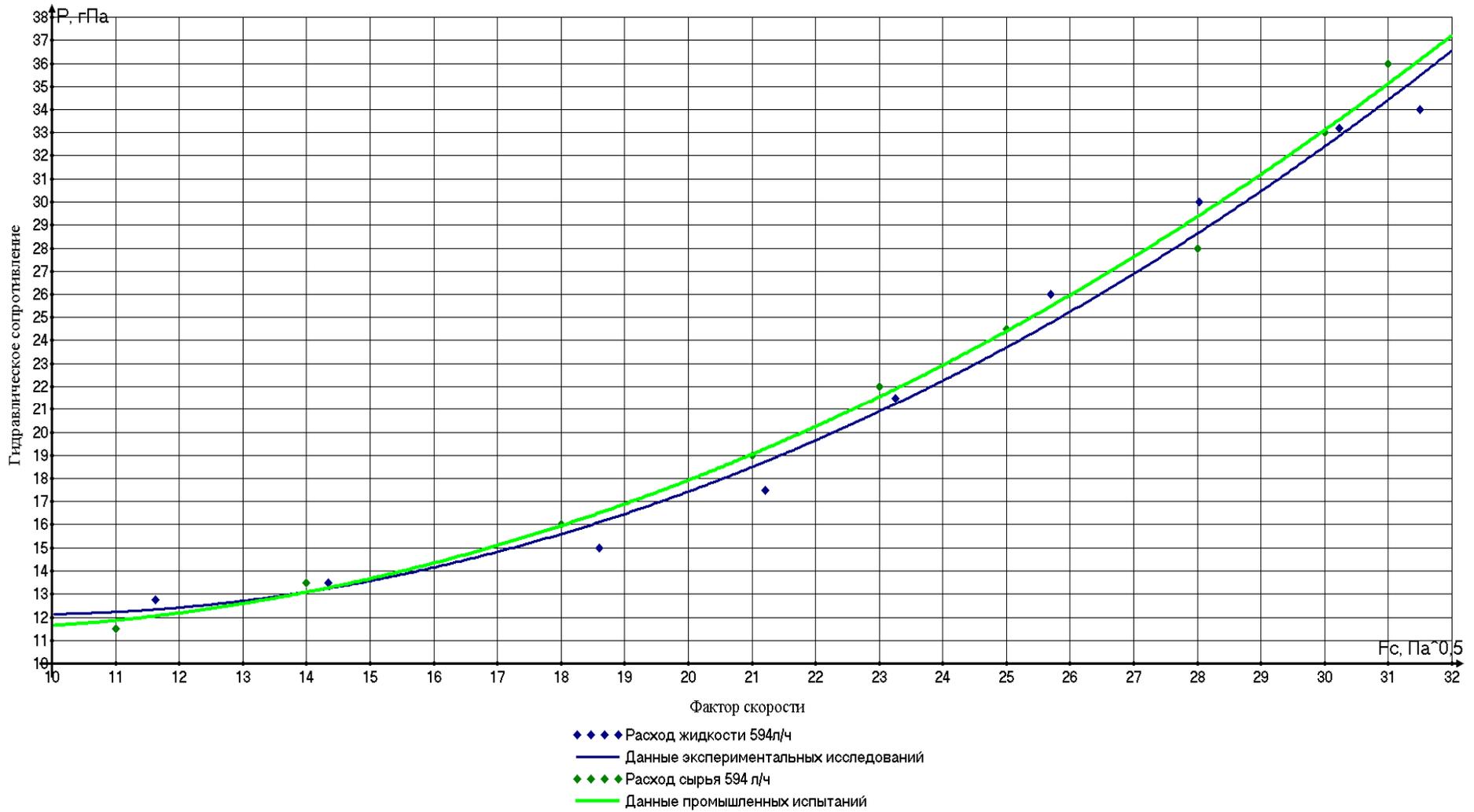


Рисунок 5.5 – Сравнительные результаты промышленных и экспериментальных исследований элемента по величине гидравлического сопротивления

Таким образом, результаты промышленных испытаний показывают, что расхождение показаний количества уноса жидкости на 1 элемент и показания гидравлического сопротивления ЦМЭ относительно экспериментальных исследований и математического моделирования, не превышает 5%. Различия показаний так же могут быть обусловлены сопротивлением тарелочного полотна, которое не учитывалось при построении математического моделирования. Результат доказывает точность проведения исследований, а так же подтверждает высокую эффективность разработанной модели.

ВЫВОДЫ

1. Поэлементный анализ существующих конструкций массообменных устройств позволил автору разработать собственную конструкцию, которая ликвидирует недостатки существующих массообменных устройств.

2. Автором предложено теоретическое обоснование конструктивных особенностей разрабатываемого центробежного массообменного устройства.

3. Разработаны основы комплексной методики расчета центробежных массообменных устройств с расчетом всех влияющих гидродинамических параметров, которая может быть использована для проведения поверочных расчетов уже эксплуатируемых промышленных колонных аппаратов с центробежными массообменными элементами.

4. Построены графоаналитические зависимости гидравлического уноса и сопротивления в центробежном массообменном элементе от фактора скорости газожидкостного потока.

5. Впервые разработана и запатентована конструкция центробежного массообменного устройства, позволяющая устранить их основной недостаток – высокий капельный унос и гидравлическое сопротивление (особенно при колебаниях расхода и состава сырья, что характерно для промысловых условий) за счет внесения конструктивных особенностей, внедренных в ходе экспериментального исследования;

6. Предложена комплексная методика расчета капельного уноса и гидравлического сопротивления центробежного массообменного элемента.

7. Автором получена зависимость скорости потока и угла закрутки потока от относительного радиуса центробежного массообменного элемента;

8. Из графиков, полученных в ходе проведения эксперимента по видно, что профиль скорости потока для исследуемых центробежных массообменных элементов имеет М-образную форму, характерную для сильно закрученных потоков, что косвенно указывает на возможность создания на базе исследованных образцов высокопроизводительных, эффективных центробежных сепарационно-массообменных элементов.

9. В ходе исследования центробежных массообменных элементов автором были разработаны две полезные модели новых центробежных массообменных элементов, подтвержденные патентом №130230 и патентом № 129408.

10. На основе полученных исследований был разработан промышленный образец, успешно внедренный в производственный процесс.

**ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ,
СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, ТЕРМИНОВ**

ПИ – патентные исследования

РОСПАТЕНТ – Федеральная служба по интеллектуальной собственности,
патентам и товарным знакам

ГК РФ – Гражданский кодекс РФ

МПК – международная патентная классификация

УДК – универсальная десятичная классификация

ЕАПО – Евразийская патентная организация

ЕАПАТИС – Евразийская патентно-информационная система

Патент ЕА – Евразийский патент

НИР – научно-исследовательская работа

ЦМЭ – центробежный массообменный элемент

ЦМУ – центробежное массообменное устройство

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стабников В. Н. «Химическое машиностроение», 1940, № 2.
2. Кафаров В. В., Бляхман Л. И., ЖПХ, 1951, т XXXIV.
3. Кафаров В. В., ЖПХ, 1958. т. XXXI.
4. Кафаров В. В., Муравьев В. С., «Химическое машиностроение», 1959, № 2.
5. Кафаров В. В., Муравьев В. С., ЖПХ, т. XXXII, 1959, № 9.
6. Kohl A. L., Gas Purification, [Текст] / Kohl A. L., Riesenfeld F. C., McGraw-Hill, New York (1960).
7. Кафаров В. В., ЖПХ, 1961, т. XXXIV.
8. Кафаров В. В., Вигдоров А. С. «Химическое машиностроение», 1961, Л» 3.
9. Евстафьев А. Г. Ректификационные установки, М., Маш-гиз, 1963.
10. Стабников В. Н. Ректификационные аппараты, М., «Маш-гиз», 1965.
11. Wandt C.J., Processes in centrifugal vehicles, / Wandt C.J., Dailey L.W. Hydrocarbon Process 46(10), 155(1967).
12. Maier P. Untersuchung isotherm endrall behafteter Freistrahlen // «ForschIng». 1968. No 5. S. 133-164.
13. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. М.: Машиностроение, 1969, с.210-220.
14. Стабников В.Н. «Расчет и конструирование контактных устройств ректификационных аппаратов», 1970, 208 с.
15. Маслов В.Е., Лебедев В.Д. «Исследование влияния гравитационной силы на движение аэрозоля в криволинейном потоке» // ИФЖ, №1, 1970, с.59-63.
16. Кемпбел Д.М. «Очистка и переработка природных газов» - Норман, США, 1972г, 449 с.
17. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М.: Химия, 1973. - 750 с.
18. Николаев Н.А. Исследование и расчет высокоэффективных аппаратов вихревого типа: Автореф. дис. д-ра техн. наук. - Казань, 1974.

19. Гринспен Х.П. «Теория вращающихся жидкостей». Л.: Гидрометеиздат, 1975.
20. Гусейнов Ч.С. и др. «Движение жидкой пленки в закрученном потоке прямоточно-центробежного патрубка сепаратора» // Труды ВНИИ экономики, организации производства и технологии. Экономическая информация в газовой промышленности, №9, 1975
21. ТребинФА., Макогон Ю.Ф., Басниев К.С. Добыча природного газа. - М.: Недра, 1976. - 368 с.
22. Мартынов А.В., Бродянский В.М. Что такое вихревая труба. М.: Энергия, 1976, с.115.
23. А.с. 498009 СССР, Бюл. изобр., 1976, №1. Массообменный аппарат / Э.И. Левданский, И.М. Плехов, А.И. Ершов.
24. Рамм В.М. Абсорбция газов. - М.: Химия, 1976. - 655 с.
25. Ахмедов Р.Б., Балагула Т.Б., Рашидов Ф.К., Сакаев А.Ю. «Аэродинамика закрученной струи» М.: Энергия, 1977. С. 8-10.
26. Ахмедов Р.Б., Балагула Т.Б., Рашидов Ф.К. и др. Аэродинамика закрученной струи / Под ред. Ахмедова Р.Б. – М.: Энергия, 1977, с.405.
27. А.с. 552983 СССР, Бюл. изобр., 1977, №13. Массообменная тарелка / Э.И. Левданский, Г.М. Яковлев.
28. Александров А.А. «Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и конструирования» - 3-е издание., перераб. М.: «Химия», 1978.
29. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. - М.: Энергия, 1978. - 704 с.
30. А.с. 625729 СССР, Бюл. изобр., 1978, №36. Теплообменный аппарат / И.М. Плехов, В.Н. Гуляев, Э.И. Левданский.
31. А.с. 679225 СССР, Бюл. изобр., 1978, №30. Центробежный сепаратор / Л.М. Мильштейн, А.В. Гугучкин, Е.П. Запорожец.
32. Крюков В.А. «Исследование процесса разделения нефти и газа в промысловых установках»: Авторефер. дис. канд. техн. наук. - Уфа; 1978.

33. Карапетьянц М.Х. «Введение в теорию химических процессов». - М.: Высшая школа, 1981. - 333 с.
34. Левданский Э.И., Плехов И.М., Гавриленкова И.И. Промышленное внедрение прямоточно-центробежных сепараторов элементного типа. – Химическая промышленность, №3, 1981, с.273-277.
35. Андропов И.В. Измерение расхода жидкостей и газов. - М.: Энергоиздат, 1981. - 88 с.
36. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. - М.: Химия, 1981. - 392с.
37. Поникаров И.И., Володин В.К., Булкин В.А. А.с. № 970756. 1982.
38. Кремлевский П.П. Измерение расхода многофазных потоков. - Л. Машиностроение, 1982. - 214с.
39. Розенцвейг А.К., Гравцов В.Г. Автоматизация расчётов при проектировании систем нефтесбора / Обз. информ. Сер. Нефтепромысловое строительство, вып.1(25). – М.: ВНИИОЭНГ, 1982, с.34-50.
40. 36. Plesset M.S., Zwicer S.A. A nonsteady heat diffusion problem with spherical symmetry. J. Appl. Physics, 1982.-v. 23. -№ 1.-P. 23-25.
41. . Шервуд Т., Массопередача / Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч М.: Химия, 1982.
42. Тепло- и массообмен: Теплотехнический эксперимент: Справочник/Под ред. Григорьева В.А. и Зорина В.М, - М.: Энергоатомиздат, 1982. - 686 с.
43. Халатов А.А., Боровский С.В. «Использование закрученных потоков в тепломассообменных технологических процессах и аппаратах» Пром. тепло-техн.. 1983. 5, N 4, с. 47-64. Рус.; рез. Англ.
44. Жданова Н.В., Халиф А.Л. «Осушка углеводородных газов» - М.: Химия, 1984г, 198 с.
45. Контроль за выбросами в атмосферу и работой газоочистных установок на предприятиях машиностроения. Практическое руководство. - М.: Машиностроение, 1984. - 128 с.

46. Гугучкин В.В., Ивановская В.И., Маркович Э.Э., Палладиев А.А. Процессы и параметры срыва жидкости с плёнки, текущей под давлением газового потока. // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках, № 6, 1984, с.46-50.
47. Левданский Э.И., Плехов И.М., Ковалев А.Н., Волк А.М. «Закономерности отвода жидкости из газо-жидкостного закрученного потока при его движении в перфорированном канале» Химия и хим. технол. (Минск). 1984, N 19, с. 100-101. Рус.
48. Левданский Э. И., Плехов И. М. «Совершенствование центробежных сепараторов элементного типа» Хим. пром-сть. 1985, N 3, с. 177-178. Рус.
49. Крошилин А.Е., Кухаренко В.Н., Нигматулин Б.И. Осаждение частиц на стенку канала в градиентном турбулентном дисперсном потоке // Известия АН СССР, МЖГ, №4, 1985, с.57-63.
50. Суслов А.Д. Иванов С.В. Мурашкин А.В. Чижиков Ю.В. Вихревые аппараты. М.: Машиностроение, 1985, с. 85-96.
51. Дулатов Ю.А., Александровский А.А. // Деп в НИИТЭХим, Черкассы. № 49. 1986.
52. Поникаров И.И., Дулатов Ю.А., Галеев Ф.А., Александровский С.А. А.с. № 1269847. 1986.
53. Сорокин Ю.Л. Разработка методов расчета и проектирования паросепарационных устройств энергооборудования: Автореф. дис. д-ра техн. наук. - НПО ЦКТИ, 1986, 40 с.
54. Поникаров И.И., Поникаров С.И., Шаплыко В.И. и другие. А.с. № 1324674. 1987.
55. Кашников А.М. – М.: Химия, 1988, 240 с.
56. Методика расчета эффективности осаждения в закрученных потоках и экспериментальное исследование теплоотдачи при взаимодействии отдельных капель с нагретой поверхностью: Отчет о НИР / ЮПИ. - 2.42.01.04-86, № ГР 01860098870.- Краснодар, 1988, 97 с.

57. Олевский В.М., «Пленочная тепло- и массообменная аппаратура». / Олевский В.М., Ручинский В.Р., 1989.
58. Левданский Э. И., Плехов И. М., Вайетхович П. Е., Волк А. М. «Определение границ перехода противоточного режима движения закрученного газожидкостного потока в прямоточный» Реол., процессы и аппараты хим. технол.. Тула. 1989, с. 91-97. Рус.
59. Завертайло М.М., Шалайкин А.Ф., Леонов Ю.Р. «Промысловая подготовка высоковязкой нефти месторождения Каражанбас». - Вопр. технол. и техн. добычи нефти терм. методами. - М., 1989, с. 38-41.
60. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков. Киев: Наукова думка, 1989, с. 285-296.
61. Труханович В. Б., Левданский Э. И., Плехов И. М., Ковалев А. Н. «Исследование эффективности разделения грубодисперсных суспензий в газоцентрибежном разделителе. Белорус. технол. ин-т. Минск. 1989, 6 с.. Библ.
62. Крамарухин Ю.Е. Приборы для измерения температуры. - М.: Машиностроение, 1990. - 208 с.
63. Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений. - Л.: Химия, 1990. - 288 с.
64. Поникаров И.И., Булкин В.А., Алексеев В.А. А.с. № 1646587. 1991.
65. Дытнерского Ю.И. «Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию» - М.: Химия, 1991. - 496 с.
66. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию/Под ред. Ю.И. Дытнерского. - М.: Химия, 1991. - 496 с.
67. Мильштейн Л.М., Бойко С.И., Запорожец Е.П. «Нефтегазопромысловая сепарационная техника: справочное пособие», под ред. Л.М. Мильштейна. – М.: Недра, 1992, 236 с.
68. Тютюнников А. Б. «Теор. осн. хим.технол. (ТОХТ)» – М, 1992, т.26, № 2,
69. Алексеенко С.В., Окулов В.Л. Закрученные потоки в технических приложениях (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т.3, №2.

70. Гасилов В.С., Гришин Д.Н., Поникаров С.И.// Изв. РАН. Сер. МЖГ. 1997. № 3.
71. Щукин, Виктор Константинович. «Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил»/ В. К. Щукин. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1980. - 240 с. - Библиогр.:1998, № 1.
72. Лебедев Ю.Н. и др. Высокоэффективные сепараторы с каплеуловителями струнного типа// Химия и технология топлив и масел. 1998. - №1. - С. 8-11.
73. Бойко С.И., Килинник С.В. Сепарационное оборудование разработанное в ОАО «НИПИгазпереработка» // Сборник материалов Всероссийского межотраслевого совещания по теме «Рациональное использование нефтяного газа и других видов легкого углеводородного сырья»: докл. - М., 1999.
74. Запорожец Е.П. «Математическая модель двухфазного струйного течения в массообменных вихревых элементах» Химическое и нефтяное машиностроение. 1999. - №11. - С. 10-13.
75. Сидягин А.А., Чехов О.С., Морозов В.А. Патент РФ № 2127630 Газожидкостный сепаратор, 1999.
76. Синицин, С.А. Переработка жидких и газообразных природных энергоносителей: Учеб.пособие / С.А. Синицин, Н.В. Королева; под ред. Н.Г. Дигурова; РХТУ им. Д.И. Менделеева. – М.: 2001. – 102 с. ;
77. Sandilya, P., Gas-Phase Mass Transfer in a Centrifugal Contactor / Sandilya, P., Rao, D. P., Sharma, A. & Biswas, G. Industrial Engineering Chemistry Research, 2001, 40, 384-392.
78. Бойко С.И., Килинник С.В., Трофимов А.С. Сепарационно-разделительная аппаратура в условиях сбора, подготовки, транспорта и переработки нефтяного газа // Сборник материалов Всероссийского межотраслевого совещания по теме «Проблемы получения и использования легкого углеводородного сырья»: Тез. докл. - М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2001.
79. Фарамазов, С.А. Оборудование нефтеперерабатывающих заводов и его эксплуатация. / С.А. Фарамазов. – М.: Химия, 2001. – 353 с.

80. Бердников В. М., Лебедев Ю. Н., Баклашов К. В., Белинский Б. И., Прохоров Е. М., Зайцева Т. М. «Реконструкция абсорбера очистки природного газа от сероводорода и диоксида углерода» Химия и технол. топлив и масел. 2001, N 3, с. 20-23. Библ. 3. Рус.
81. Холпанов Л. П., Мочалова Н. С. «Нелинейное взаимодействие газового потока с волновой пленкой жидкости с учетом срыва (осаждения) капель с поверхности» Теор. основы хим. технол.. 2001. 35, N 4, с. 349-354. Рус.
82. Жидков М.А. «Взаимосвязь сепарационных и термодинамических характеристик трехпоточных вихревых труб» Химическое и нефтегазовое машиностроение. -2001-№5 -С. 8-11.
83. Лебедев Ю. Н., Чекменев В. Г. «Массообменные колонные аппараты. Современные принципы конструирования» Химия и технол. топлив и масел. 2002, N 1, с. 25-28. Рус.
84. Тронов В.П. Сепарация газа и сокращение потерь нефти. Казань: «Фен», 2002. 408 с.
85. Танатаров, М.А. Технологические расчеты установок переработки нефти: Учеб.пособие для вузов / М.А. Танатаров, М.Н. Ахметшина, Р.А. Фасхутдинов и др. – М.: Химия, 2003. – 352 с.
86. Чекменев В. Г., Лебедев Ю. Н., Косьмин В. Д. (НПК "Кедр-89") Центробежные тарелки с делением потока жидкости Химия и технол. топлив и масел. 2004, N 1, с. 46-47, 4 ил.. Библ. 1. Рус.
87. Левданский А. Э., Чиркун Д. И., Левданский Э. И. «Экспериментальные исследования проточного роторно-центробежного сепаратора» Хим. промышленность. 2004, N 2, с. 64-67. Рус.
88. Лебедев Ю. Н. (НПК "Кедр-89") Высокопроизводительные тарелки центробежного типа Химия и технол. топлив и масел. 2004, N 1, с. 43-45, 3 ил.. Библ. 6. Рус.
89. Коптев А.А. «Движение жидкости в центробежных полях». Ч. 1. Течение жидкости вблизи вращающегося диска. М.: "Издательство Машиностроение-1", 2005. 240 с.

90. Кондранин Т.В., Ткаченко Б.К., Березникова М.В., Евдокимов А.В., Зуев А.П. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: Учебное пособие. М.: МФТИ, 2005. 104 с.
91. Хуторянский Ф.М., Сомов В.Е., Каминский Э.Ф. Современное состояние установок глубокого обезвоживания и обессоливания нефти российских НПЗ. Пути совершенствования процесса и его технического перевооружения // Сборник научных трудов ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез» и ООО НИФ «ИНЖЕНЕР-СЕРВИС ВНИИНП». Кириши-Москва: Издательско-полиграфическое производство ОАО «ЦНИИТЭнефтехим», 2005. С. 6-27.
92. Санников Д. И. «Структура закрученной струи на выходе сопла Вентури»/ Д. И. Санников //Транспортное дело России. –М.: Морские вести России, 2006. –Спецвыпуск № 11, ч.4. –С.24–26.
93. Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холпанов Л.П. «Интенсификация тепло - и массообмена на макро-, микро - и наномасштабах» М.: ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008, 532 с.
94. Патент 78090 РФ МПК В01D 45/12, Прямоточный центробежный элемент/ Литра А.Н., Коновалов И.Л., Ушенин А.В., Корженко М.А.; Заявл. 19.05.2008г.; Опубл. 20.11.2008г.
95. А.Н. Литра Расчёт потерь давления в дросселе регулирующего устройства // IV Ежегодная региональная отраслевая научно-техническая конференция «Проблемы развития автоматизации и механизации процессов добычи, переработки и транспорта газа и газового конденсата», г.Краснодар, ОАО «НПО Промавтоматика», 2008.
96. А.Н. Литра ,П.С. Кунина, П.П. Павленко Исследование модели прямооточного центробежного элемента //Газоил пресс// «Газовая промышленность» №12 /639/2009.
97. Лебедев Ю. Н. «Современное высокоэффективное оборудование для переработки нефти и нефтехимии» Хим. техн.. 2008, N 3, с. 18-20, 13 ил.. Рус.

98. Борисов И. И., Халатов А. А. «Гидродинамика, тепло- и массообмен во вращающихся барботажных потоках» Доп. Нац. АН України. 2008, N 3, с. 84-89. Библ. 15. Рус.; рез. англ.
99. Лебедев Ю. Н., Чекменев В. Г., Данилов Д. Ю. (НПК "Кедр-89") «Испытание новых центробежных тарелок с рециркуляцией жидкости» Химия и технология топлив и масел. 2010, N 4, с. 40-43. Рус.; рез. англ.
100. Журнал: Газовая промышленность. «Основные направления и пути совершенствования сепарационного оборудования входных и концевых ступеней» 11/666/2011
101. Журнал: Технологии органических и неорганических веществ и экология. - 2011 - 1/9 (49) «Закономерности процесса массообмена в центробежном аппарате»

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 130230

МАССООБМЕННОЕ УСТРОЙСТВО

Патентообладатель(и): *Открытое акционерное общество
"Научно-исследовательский и проектный институт по
переработке газа" ОАО "НИПИгазпереработка" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012155917

Приоритет полезной модели 21 декабря 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 20 июля 2013 г.

Срок действия патента истекает 21 декабря 2022 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.И. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU**⁽¹¹⁾ **130 230**⁽¹³⁾ **U1**(51) МПК
B01D 3/26 (2006.01)**(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2012155917/05, 21.12.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
21.12.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 21.12.2012

(45) Опубликовано: 20.07.2013 Бюл. № 20

Адрес для переписки:

350000, г.Краснодар, ул. Красная, 118, ОАО
"НИПИгазпереработка", НТО, Каренной
Л.Н.

(72) Автор(ы):

Солодовник Дмитрий Васильевич (RU),
Литвиненко Александр Викторович (RU),
Бойко Сергей Иванович (RU),
Тютюнник Георгий Геннадьевич (RU),
Грицай Максим Александрович (RU),
Арестенко Артем Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Открытое акционерное общество "Научно-
исследовательский и проектный институт по
переработке газа" ОАО
"НИПИгазпереработка" (RU)**(34) МАССООБМЕННОЕ УСТРОЙСТВО****(57) Формула полезной модели**

1. Массообменное устройство, включающее установленное в корпусе осн ование с, по крайней мере, одним центробежным элементом, включающим цилиндрический патрубок, снабженный в верхней части сепарационным устройством, а в нижней части - тангенциальным завихрителем, закрытым доньшком, коаксиальный канал для подачи жидкости на доньшко завихрителя, элемент дробления, отличающееся тем, что устройство имеет не менее двух оснований, а коаксиальный канал для подачи жидкости представляет собой питающую трубку, верхний торец которой установлен в выпележащем основании, при этом элемент дробления кольцеобразно расположен на внешней поверхности питающей трубки и/или на внутренней поверхности цилиндрического патрубка.

2. Массообменное устройство по п.1, отличающееся тем, что элемент дробления выполнен в виде сетки.

3. Массообменное устройство по п.1, отличающееся тем, что элемент дробления выполнен в виде торообразной насадки или набора торообразных насадок.

4. Массообменное устройство по п.1, отличающееся тем, что элемент дробления выполнен в виде клинообразной насадки или набора клинообразных насадок.

5. Массообменное устройство по любому из пп.2-4, отличающееся тем, что элемент дробления выполнен из гидрофобного материала.

6. Массообменное устройство по п.1, отличающееся тем, что элемент дробления выполнен в виде надсечек, нанесенных на поверхность питающей трубки и/или на внутреннюю поверхность цилиндрического патрубка.

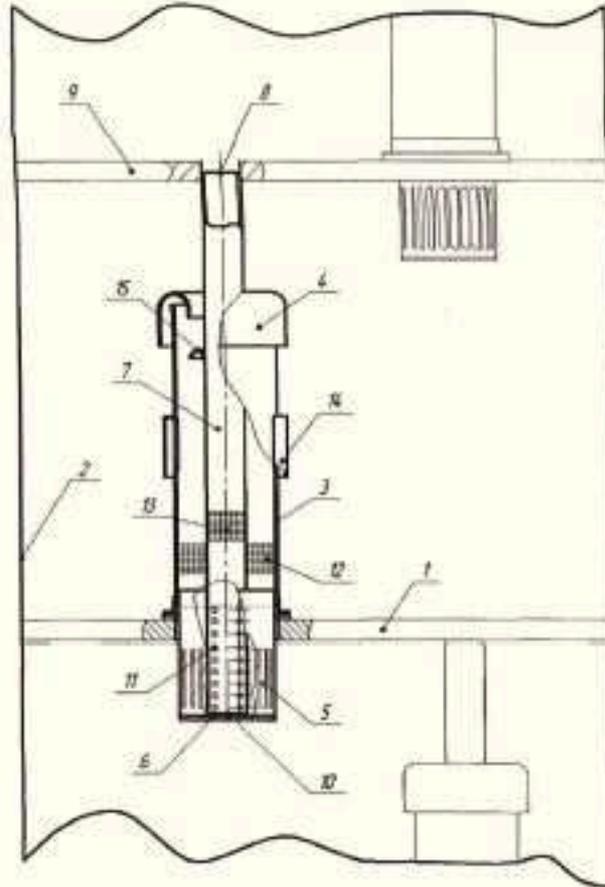
7. Массообменное устройство по п.1, отличающееся тем, что элементов дробления на внешней поверхности питающей трубки и/или на внутренней поверхности

RU 130230 U1

цилиндрического патрубка установлено несколько.

8. Массообменное устройство по п.1, отличающееся тем, что в верхней части цилиндрического патрубка на равном расстоянии друг от друга выполнены прорези.

9. Массообменное устройство по п.1, отличающееся тем, что на поверхности питающей трубки перед сепарационным устройством установлена экранирующая насадка.



RU 130230 U1

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 129408

УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТАКТА ГАЗА И ЖИДКОСТИ

Патентообладатель(ли): *Открытое акционерное общество
"Научно-исследовательский и проектный институт по
переработке газа" (ОАО "НИИГазпереработка") (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012155918

Приоритет полезной модели **21 декабря 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **27 июня 2013 г.**

Срок действия патента истекает **21 декабря 2022 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.Л. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) RU⁽¹¹⁾ 129 408⁽¹³⁾ U1
(51) МПК
B01D 3/26 (2006.01)

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

<p>(21)(22) Заявка: 2012155918/05, 21.12.2012</p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 21.12.2012</p> <p>Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 21.12.2012</p> <p>(45) Опубликовано: 27.06.2013 Бюл. № 18</p> <p>Адрес для переписки: 350000, г.Краснодар, ул. Красная, 118, ОАО "НИИГазпереработка", НТО, Каренной Л.Н.</p>	<p>(72) Автор(ы): Солодовник Дмитрий Васильевич (RU), Литвиненко Александр Викторович (RU), Бойко Сергей Иванович (RU), Тютюнник Георгий Геннадьевич (RU), Грицай Максим Александрович (RU), Арестенко Артем Юрьевич (RU)</p> <p>(73) Патентообладатель(и): Открытое акционерное общество "Научно- исследовательский и проектный институт по переработке газа" (ОАО "НИИГазпереработка") (RU)</p>
---	---

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТАКТА ГАЗА И ЖИДКОСТИ

(57) Формула полезной модели

1. Устройство для контакта газа и жидкости, содержащее установленное в корпусе основание с, по крайней мере, одним центробежным элементом, включающим цилиндрический патрубок, снабженный в верхней части сепарационным устройством, а в нижней части - тангенциальным завихрителем с доньником, коаксиальный канал для подачи жидкости, отличающееся тем, что устройство имеет не менее двух оснований и камеру для контакта фаз, выполненную в форме цилиндрического стакана, установленную с зазором под основанием, в которой размещен тангенциальный завихритель с зазором к корпусу камеры, а коаксиальный канал для подачи жидкости представляет собой питающую трубку, верхний торец которой установлен в вышележащем основании, а нижняя часть питающей трубы расположена в центральной части завихрителя, при этом нижний торец питающей трубки вмонтирован в отверстие, выполненное в доньнике завихрителя.

2. Устройство для контакта газа и жидкости по п.1, отличающееся тем, что в нижней части цилиндрического патрубка на внешней поверхности питающей трубки и/или на внутренней поверхности цилиндрического патрубка кольцеобразно расположен элемент дробления.

3. Устройство для контакта газа и жидкости по п.2, отличающееся тем, что элемент дробления выполнен в виде сетки.

4. Устройство для контакта газа и жидкости по п.2, отличающееся тем, что элемент дробления выполнен в виде торообразной насадки или набора торообразных насадок.

5. Устройство для контакта газа и жидкости по п.3 или 4, отличающееся тем, элемент дробления выполнен из гидрофобного материала.

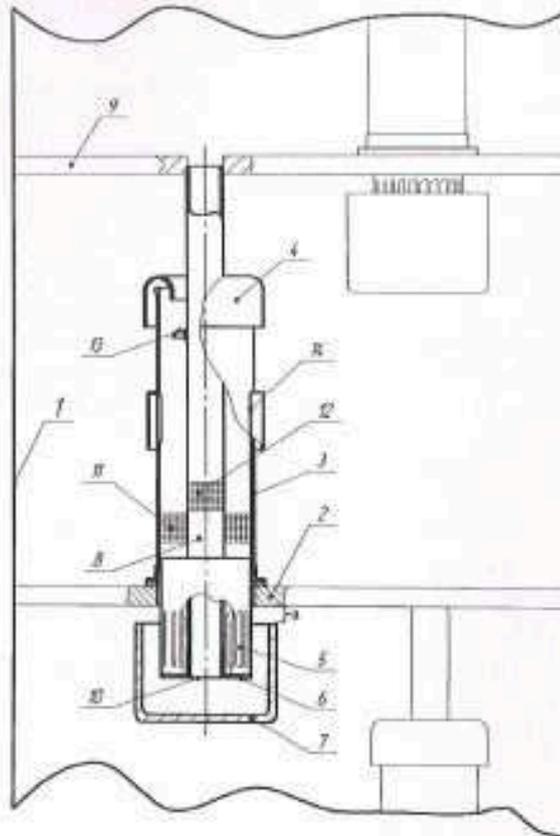
6. Устройство для контакта газа и жидкости по п.2, отличающееся тем, что элемент

дробления выполнен в виде надсечек, нанесенных на поверхность питающей трубки и/или на внутреннюю поверхность цилиндрического патрубка.

7. Устройство для контакта газа и жидкости по п.2, отличающееся тем, что элементов дробления на внешней поверхности питающей трубки и/или на внутренней поверхности цилиндрического патрубка установлено несколько.

8. Устройство для контакта газа и жидкости по п.1, отличающееся тем, что в верхней части цилиндрического патрубка на равном расстоянии друг от друга выполнены прорезы.

9. Устройство для контакта газа и жидкости по п.1, отличающееся тем, что на поверхности питающей трубки перед сепарационным устройством установлена экранящая насадка.



RU 1 2 9 4 0 8 U 1

RU 1 2 9 4 0 8 U 1

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт внедрения



Общество с ограниченной ответственностью
**«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО
 ПЕРЕРАБОТКЕ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА»**
 (ООО «НИИГАЗПЕРЕРАБОТКА»)

ОГРН 1142348000277 ИНН 2348036049 КПП 234801001 тел.: +7 (861) 991-00-20

А К Т

пгт. Афипский

«15» апреля 2015 г.

о внедрении результатов научно-исследовательской работы
**«Исследование и совершенствование центробежного массообменного устройства для
 нефтяной и газовой промышленности»**

Разработка Солодовника Дмитрия Васильевича передана ООО «Научно-исследовательский институт по переработке попутного нефтяного газа» в виде чертежей для дальнейшего изготовления и внедрения в рамках работ по модернизации блока переработки углеводородного сырья. Научно-технические разработки в составе: техническая документация, переданные названному предприятию внедрены с июля 2014 года.

Назначение внедренных разработок: оптимизация конструкции блока и технологических режимов очистки и перегонки углеводородного сырья, а так же повышение его производительности с целью получения стабильного качества товарного продукта, соответствующего установленным стандартам и значительной экономии энергоресурсов, необходимых для осуществления указанного процесса.

Научно-технический эффект – возможность перенастройки существующего оборудования с минимальными затратами при значительном увеличении производительности блока.

Эффективность внедрения состоит в получении качественного конечного продукта при минимально возможных материальных затратах на модернизацию оборудования при значительном повышении производительности и эффективности блока. Фактический экономический эффект с момента применения разработанного устройства с 01.08.2014 года по сегодняшний день составляет 253 800 руб.

Расчет экономического эффекта составляет коммерческую тайну предприятия, поэтому в диссертационной работе не приводится.

Социальный эффект: развитие научных исследований в направлении разработки новых тарелок с центробежными массообменными элементами, а так же улучшение методики расчета капельного уноса для более точного ведения технологического процесса.

Генеральный директор
 ООО «НИИГАЗПЕРЕРАБОТКА»



А.Ю. Гайдар

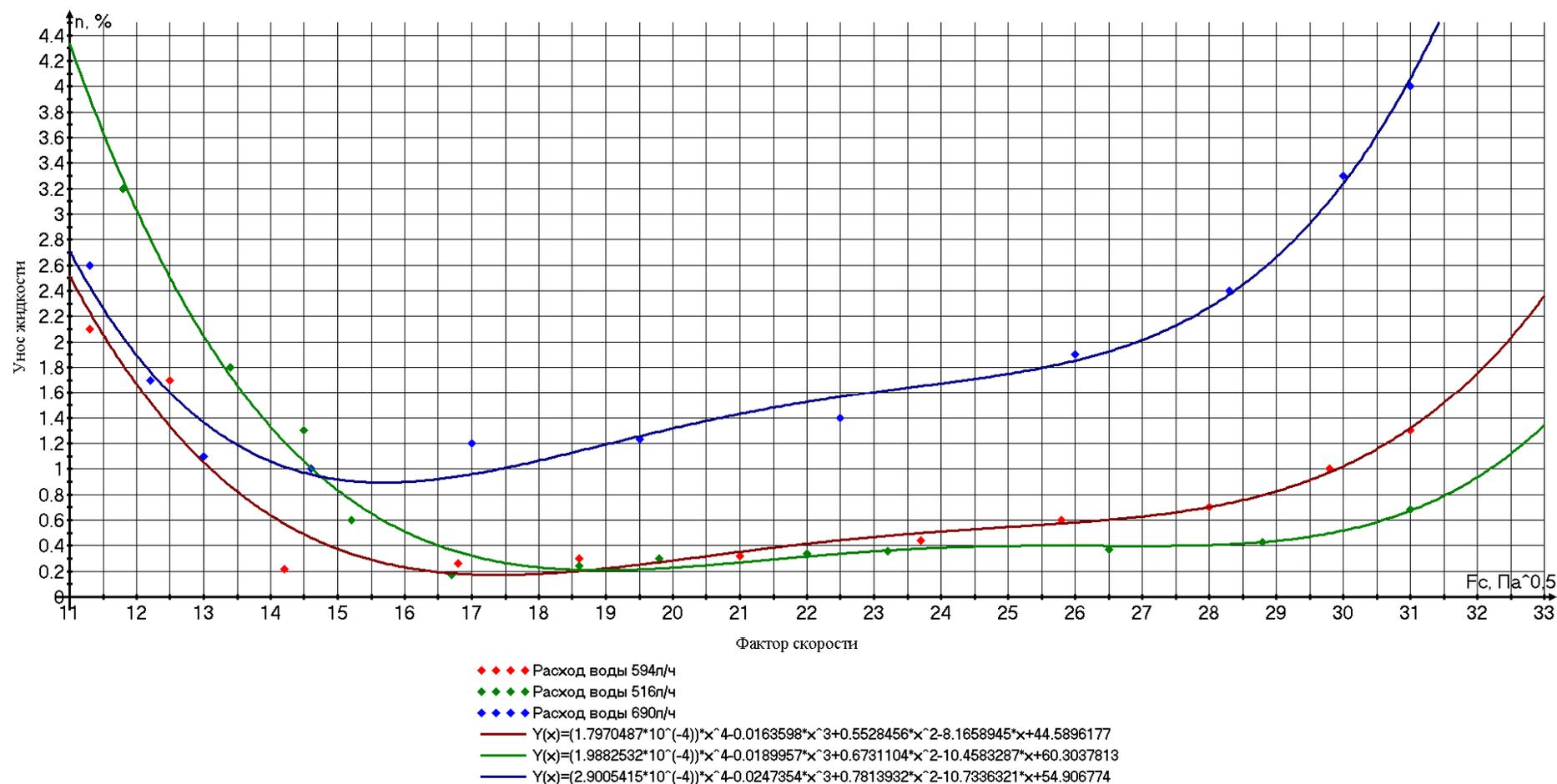
ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Центробежный массообменный элемент модели 5 Ду100



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

График работы элемента 5 Ду100 при различных расходах жидкости



ПРИЛОЖЕНИЕ Е

График зависимости разницы гидравлического давления ΔP от фактора скорости потока F_c модели 5 Ду100

