

На правах рукописи



Солодовник Дмитрий Васильевич

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

Специальность: 05.02.13 « Машины, агрегаты и процессы
(в нефтяной и газовой промышленности)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Краснодар – 2016

Диссертация выполнена на кафедре «Оборудования нефтяных и газовых промыслов» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный технологический университет»

Научный руководитель

Кунина Полина Семеновна

доктор технических наук, профессор кафедры оборудования нефтяных и газовых промыслов в ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты:

Кириллов Валерий Александрович

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института катализа СО РАН, г. Новосибирск

Ильин Владимир Владиславович

кандидат технических наук, ведущий инженер отдела по проектированию объектов проектного офиса "Развитие Ярегского нефтяного месторождения" НШУ «Ярегнефть» ООО «Лукойл-Коми», г. Ухта

Ведущая организация:

ООО «Научно-производственная компания «ЭКСБУР-К», г. Краснодар

Защита состоится «16» июня 2016 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д212.291.02 в ФГБОУ ВО «Ухтинском государственном техническом университете» по адресу: ул. Первомайская, 13, г. Ухта, Республика Коми, 169300

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», а так же на сайте вуза по адресу www.ugtu.net в разделе «диссертации».

Автореферат разослан «15» апреля 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.291.02, кандидат технических наук

 М.М. Бердник

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. 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 увеличить доход предприятий и повысить качество и количество конечного продукта.

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 за счет высокой производительности и эффективности при минимальных габаритно-массовых размерах. 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. В данной работе совершенствование центробежного массообменного элемента обусловлено за счет улучшения его гидродинамических характеристик и величины капельного уноса.

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 ха-

рактических 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 центробежного контактного 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 ПАО «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 7 печатных работ, в том числе 2 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (Скопус), 2 патента РФ.

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на:

- всероссийская межотраслевая конференция (ВМОС) «Современные массо-обменные устройства для процессов переработки углеводородного сырья» сентябрь 2012г., г.Геленджик.;

- НИТПО. Международная научно-практической конференция «Сбор, подготовка и транспортировка углеводородов -2013». г.Сочи, Краснодарский край 25 – 30 марта 2013 г.;

- конкурс научно-технических работ ПАО «НИПИГазпереработка», 2013г. (г. Краснодар);

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

- конкурс молодых работников и специалистов ПАО «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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цели и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность.

В первой главе представлен аналитический обзор существующих контактных устройств, их видов, конструктивных исполнений и характеристик, отвечающих за эффективность, сложность изготовления и стоимость.

Процессы переработки нефти и газа претерпели в своем развитии как качественные, так и количественные изменения, вытекающие из задач развития народного хозяйства нашей страны. 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 стадий реакции, массопереноса и последующего разделения контактирующих фаз.

В современных ректификационных и абсорбционных установках используются различные контактные устройства. Общепринятой классификации их до сих пор не имеется.

Из различных видов контактных устройств перспективным направлением развития автором выбрана тарелка с центробежными массообменными элементами.

В таблице 1 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 ПАО "НИПИГазпереработка".

Таблица 1 –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
Центробежная тарелка	2,0...2,5	1,1-1,3	2-2,5	110-130	1,1	1,4-1,5

Требования, предъявляемые к контактным устройствам колонных аппаратов установок подготовки газа весьма разнообразны.

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 установках подготовки газа наблюдаются значительные колебания количества и качества перерабатываемого сырья.

При оценке конструкций тарелок обычно принимаются во внимание следующие наиболее характерные и значимые 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).

Хотя разрабатываемая 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 рекомендовать 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 и очистки газа, скрубберы, абсорберы МАУ, укрепляющие секции абсорберов НТА и НТК.

Разработки центробежного массообменного устройства ведутся многими на-

учными фирмами, такими как «ЦКБН», «Зульцер» и др. Изучив различные конструкции центробежных устройств с их плюсами и недостатками, автором была предложена собственная модель, вобравшая в себя наилучшие качества предыдущего опыта разработок и исключая их недостатки.

Главной проблемой центробежных массообменных элементов является наличие центральной поперечной трубки, которая встречается у большинства производителей и является причиной дробления потока во время его закрутки, что увеличивает унос газожидкостной смеси и уменьшает эффективность центробежного массообменного устройства.

Данные недостатки отсутствуют в центробежном сепарационном элементе ПАО "НИПИгазпереработка" (патент № 2140317), на основе которого был создан образец центробежного массообменного устройства, принципиальная схема которого приведен на рисунке 1.1.

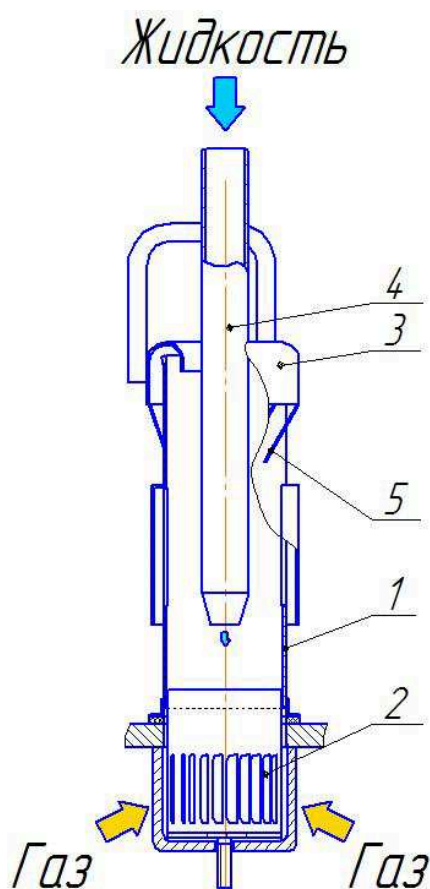


Рисунок 1.1 - Принципиальная схема центробежного массообменного элемента

В этой конструкции отсутствует воронка и поперечная трубка для подачи жидкости, а, значит, формирование закрученного потока будет происходить без разрывов. 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 1.2.

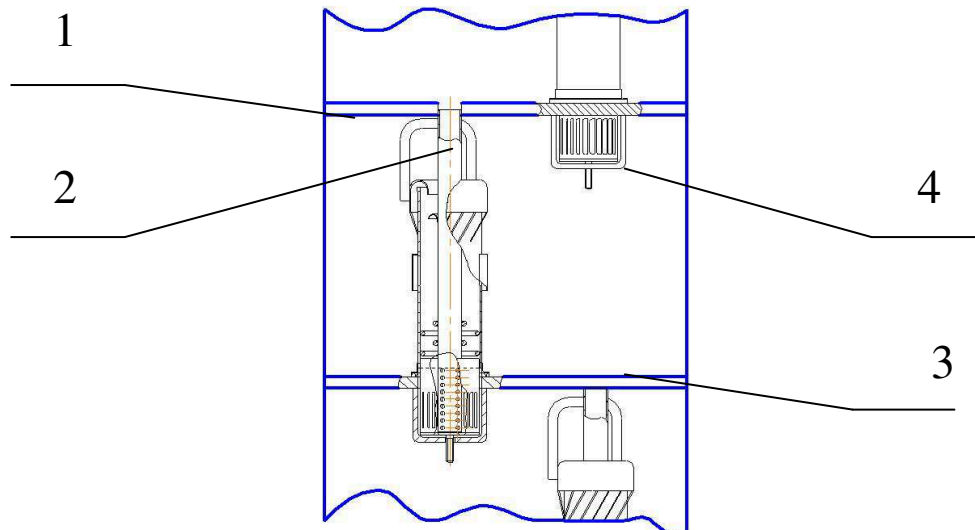


Рисунок 1.2 - Принципиальная схема работы исследуемых тарелок

Жидкость с поверхности тарелки 1 стекает в центральную трубку 2 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 3, а газ уходит через завихритель вышестоящего элемента 4 на верхний уровень.

Вторая глава посвящена математическому моделированию центробежного массообменного устройства.

В качестве экспериментальной модели центробежного массообменного элемента выбран центробежный массообменный элемент представленный на рисунке 1.1 с различными вариациями глубины посадки центральной трубки, названной конструктивным фактором.

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

$$\Delta P = A \cdot F_c^2 - B \cdot F_c + C, \quad (1)$$

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 :

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

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:

$$F = \frac{L}{V} \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L}}, \quad (3)$$

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:

$$F_c = V_{сеч} \sqrt{\rho_v}, \quad (4)$$

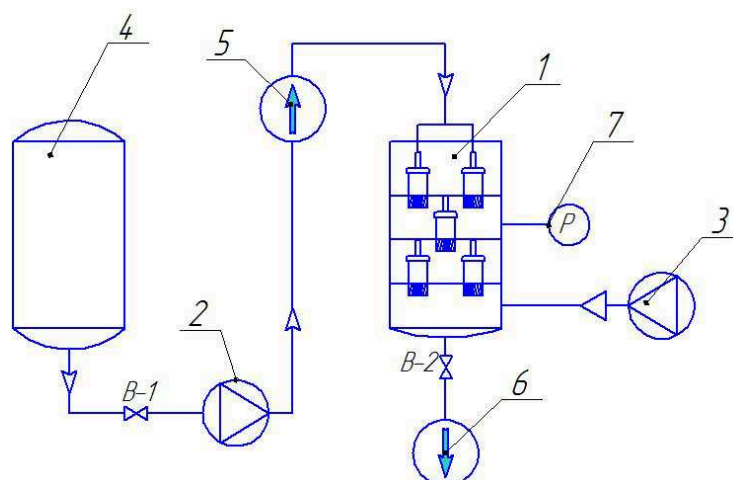
где $V_{сеч}$ – скорость потока в сечении, кг/с

В третьей главе описаны экспериментальные установки, созданные для исследования центробежных массообменных элементов, и методика проведения экспериментов.

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.

Принцип работы стенда для определения капельного уноса жидкости и гидродинамического сопротивления центробежного массообменного устройства приведен на рисунке 2.



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

Рисунок 2-Принципиальная схема экспериментальной установки.

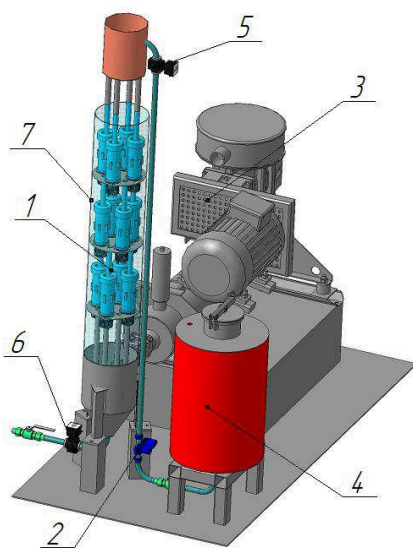
Разработанные образцы установлены в колонне 1. В питающие трубки центробежных массообменных элементов с помощью насоса 2 подается жидкость из ёмкости 4. Расход поступающей жидкости контролируется расходомером 5. Воздуходувкой 3 в колонну нагнетается воздух. В процессе массообмена в колонне отсепарированная 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.

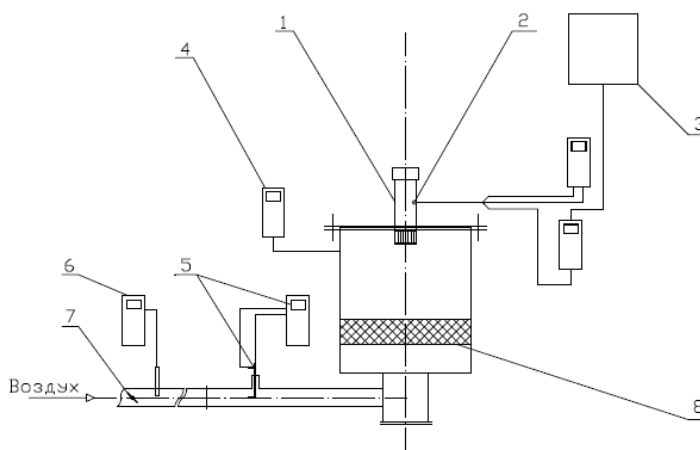
Рабочим телом в исследованиях послужила смесь вода-воздух. Аэродинамическое исследование проточного центробежного массообменного элемента с профилированной проточной частью проведено на экспериментальном стенде для аэродинамических исследований. Схема экспериментального стенда для определения поля скоростей представлена на рисунке 4.

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



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

Рисунок 3. Общий вид экспериментальной установки. для определения капельного уноса жидкости и гидродинамического сопротивления центробежного массообменного устройства



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 4 – Схема экспериментального стенда для определения поля скоростей после завихрителя.

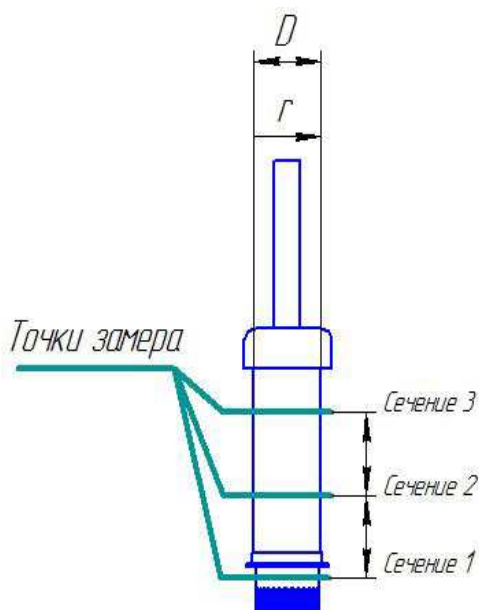


Рисунок 5 – Схема расположения секущих плоскостей для измерения параметров потока в прямоточном центробежном массообменном элементе с центральной трубкой.



Рисунок 6 – Центробежное массообменное устройство Ду100, модель 4.1

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 $\alpha = 45^{\circ}$, при расходах газового потока перед завихрителем $Q_1=100\text{м}^3/\text{ч}$, $Q_2=200\text{м}^3/\text{ч}$, $Q_3=300\text{м}^3/\text{ч}$, $Q_4=400\text{м}^3/\text{ч}$.

Измерения проводились в трех плоскостях (сечениях) центробежного сепарационного элемента (рисунок 5).

В четвертой главе описаны результаты экспериментального исследования.

При первом приближении были рассмотрены и исследованы различные модели центробежных массообменных устройств, разработанных автором, отличающиеся как конструктивным фактором, так и габаритными характеристиками.

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 6 и 7.

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

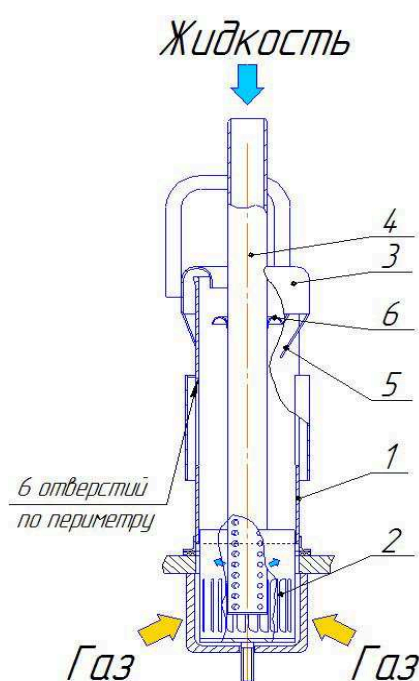


Рисунок 7– схема работы центробежного массообменного устройства Ду100, модель 4.1

Таблица 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 (2).

Значения коэффициентов жидкостного уноса приведены в таблице 3.

Таблица 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

Результаты аэродинамических исследований.

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.

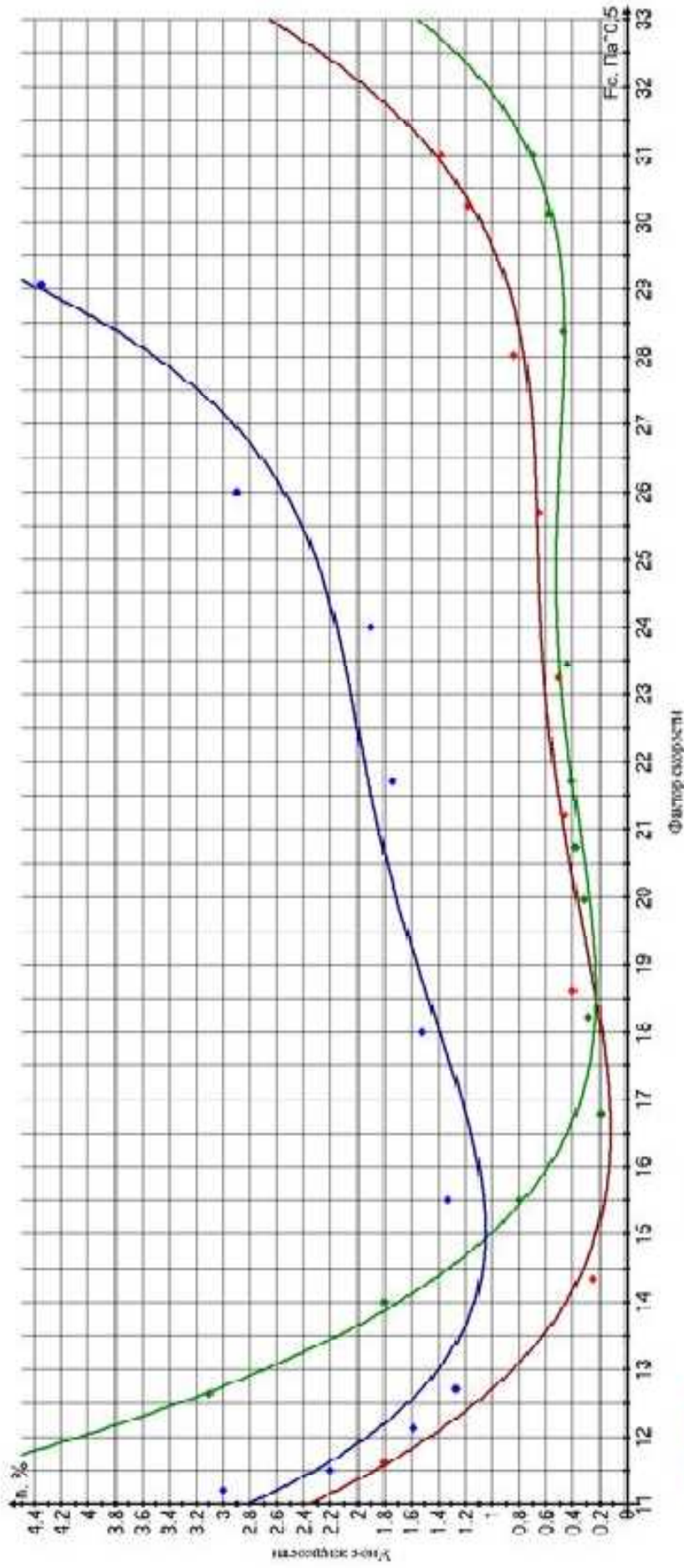
помог установленный на модели преградитель жидкости 6. Он представляет собой подобие каплеотбойника 3, установленное на центральную трубку. Таким образом, жидкость,двигающаяся по центральной трубке, отбивается на стенку центробежного элемента и сепарируется.

Проведенные испытания на этой модели показали её высокую эффективность. Результаты испытания модели 4.1 показаны в виде графиков на рисунке 8 – 9.

Как показано на рисунке 8, конструкция элемента 4.1 позволяет эффективно работать при максимальном расходе жидкости 690л/ч, при этом величина гидравлического уноса не превышает 5%. Это доказывает эффективность выбранной конструкции.

Для расчета гидравлического сопротивления элемента автором была предложена параболическая зависимость гидравлического давления ΔP от фактора скорости F_c (1)

Для элемента 4.1 значения этих коэффициентов представлены в таблице 2



- ◆◆◆ Расход воды 594л/ч $Y(x) = (2.2373019 \cdot 10^{-10} \cdot (-4))^x \cdot 4 - 0.02014 \cdot x^3 + 0.6686969 \cdot x^2 - 9.6400416 \cdot x + 51.018207$
- ◆◆◆ Расход воды 516л/ч $Y(x) = (2.8939995 \cdot 10^{-10} \cdot (-4))^x \cdot 4 - 0.0276839 \cdot x^3 + 0.9790564 \cdot x^2 - 15.1377862 \cdot x + 86.5775877$
- ◆◆◆ Расход воды 690л/ч $Y(x) = (4.3559136 \cdot 10^{-10} \cdot (-4))^x \cdot 4 - 0.0355542 \cdot x^3 + 1.07563 \cdot x^2 - 14.1571083 \cdot x + 69.3287416$

Рисунок 8 - График работы элемента 4.1 Ду100 при различных расходах жидкости

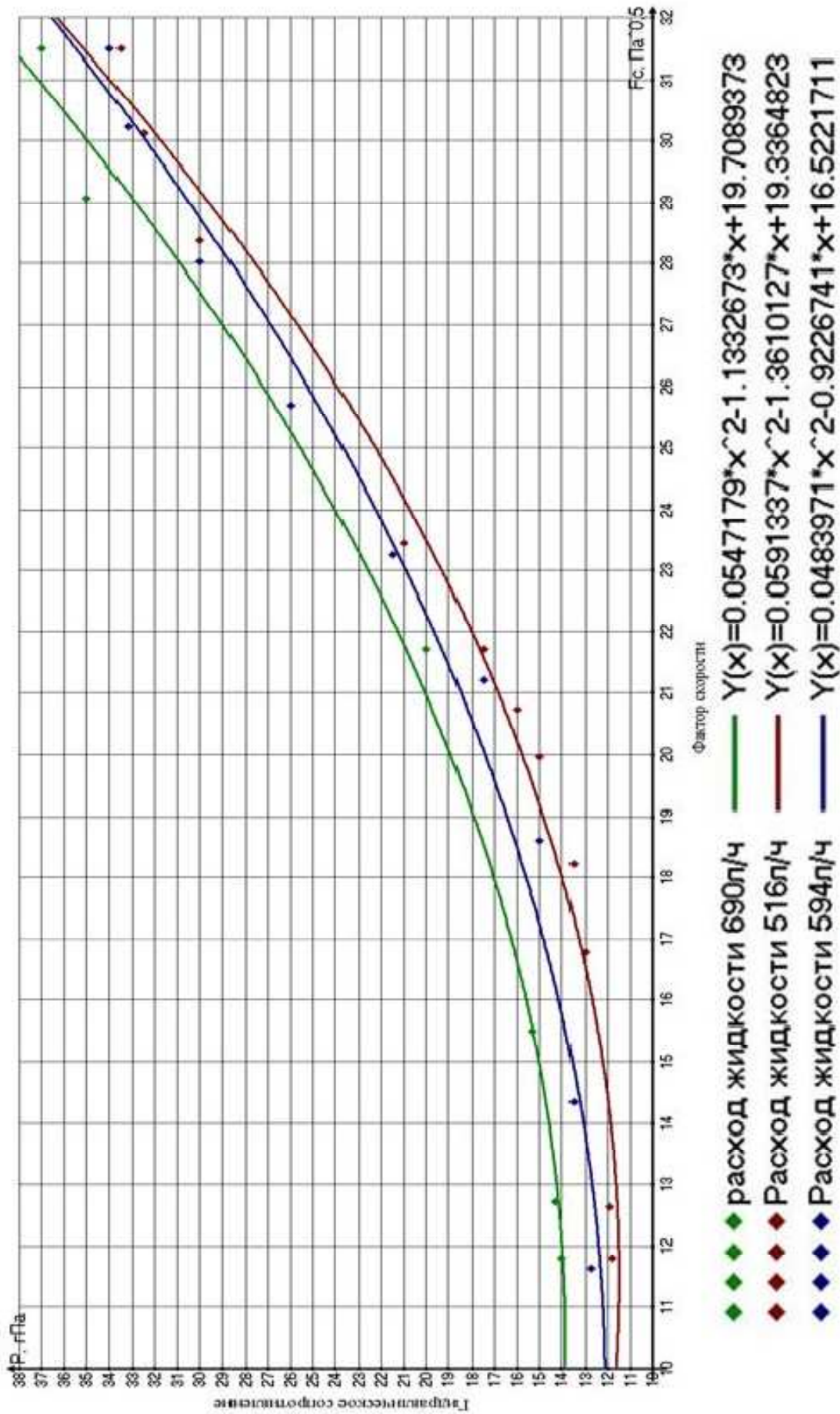
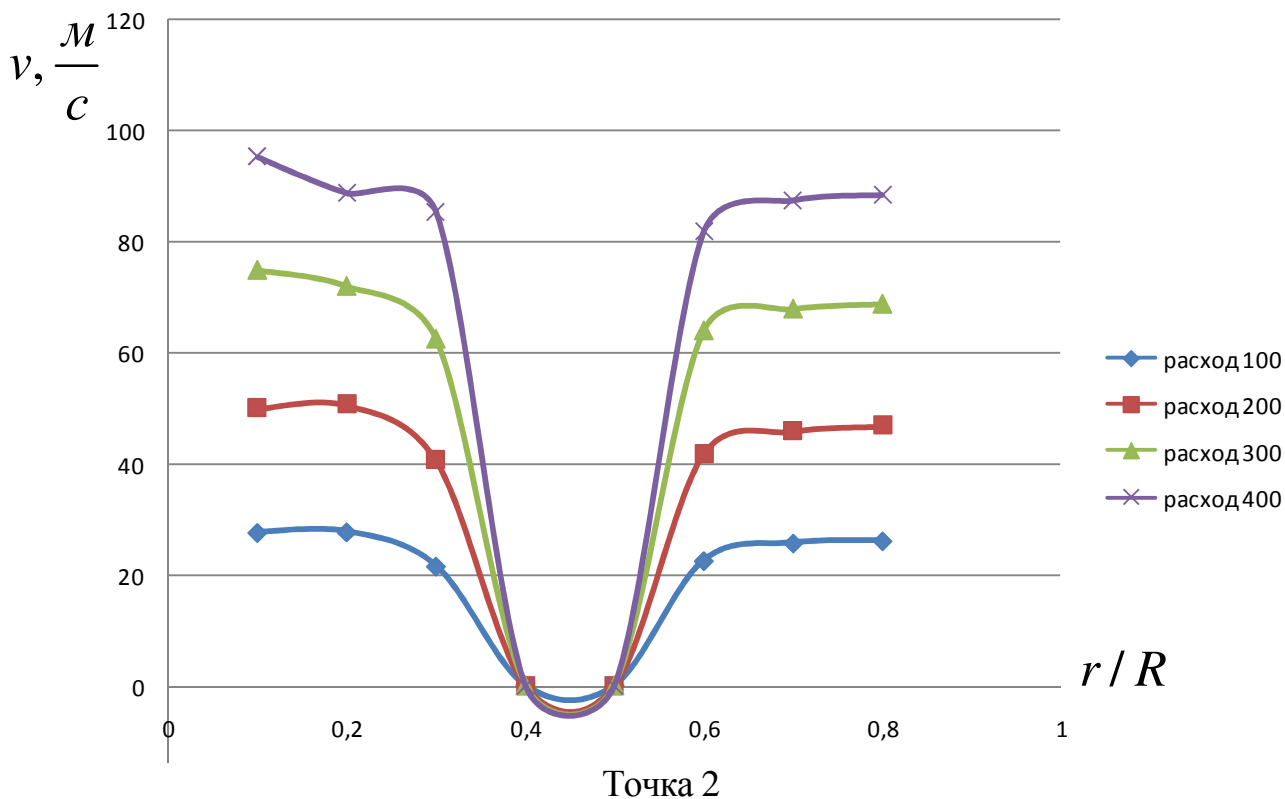
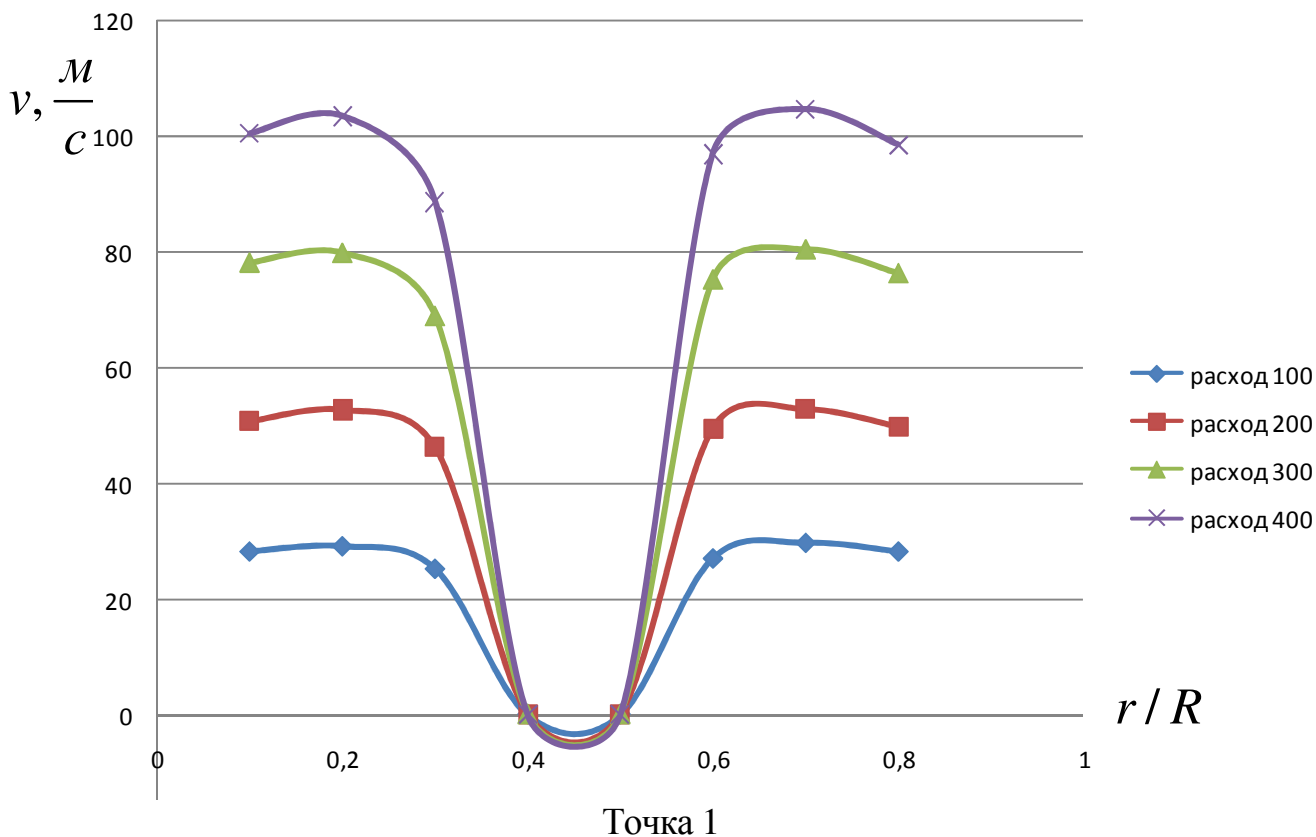


Рисунок 9 - График зависимости разницы давления ΔP от фактора скорости потока F_c модели 4.1 Ду100

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 сепаратора, но не ухудшит эффективность его работы, повысив пропускную способность.



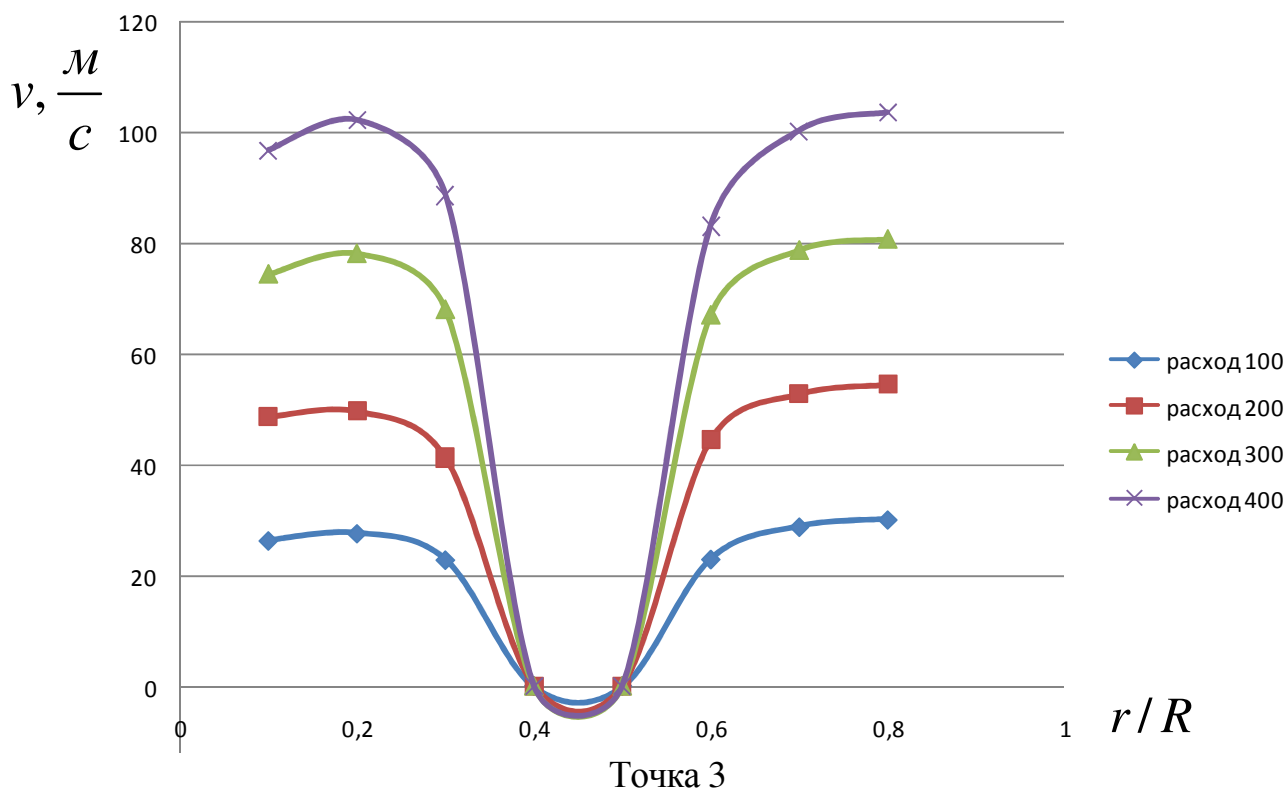
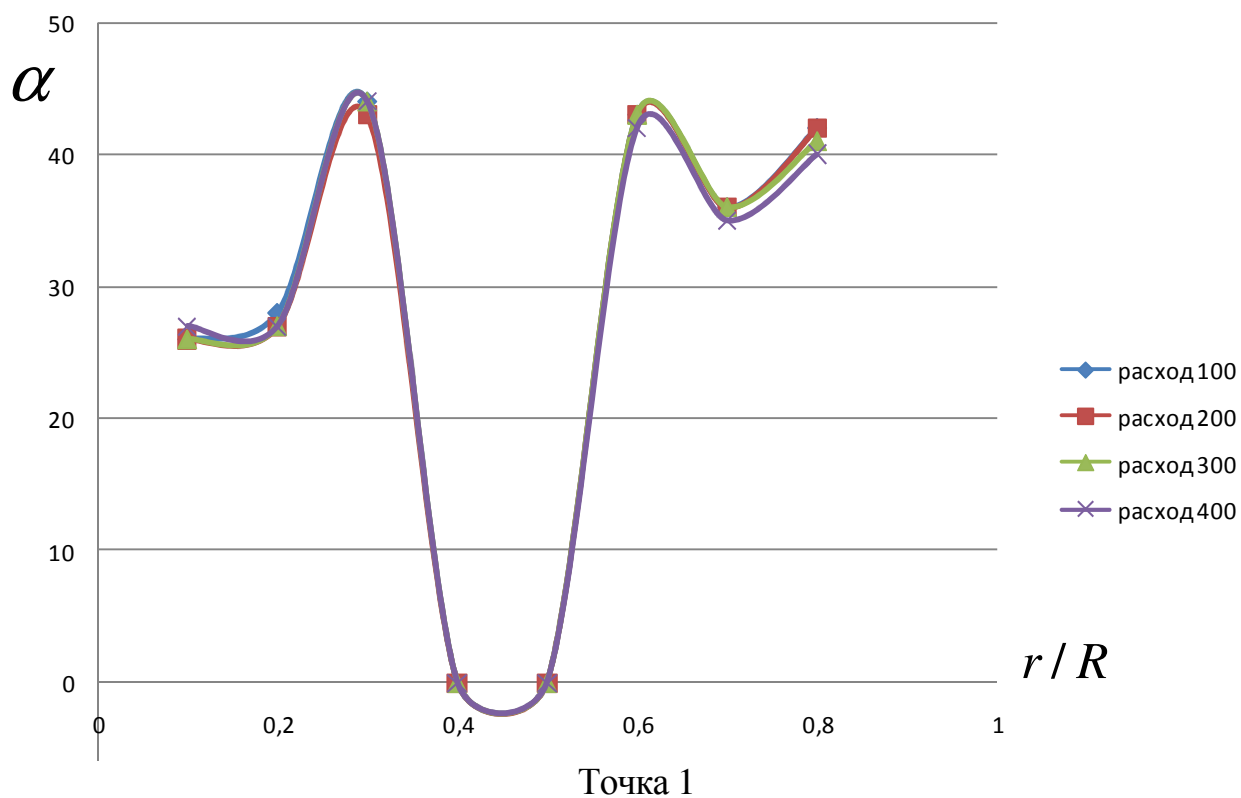


Рисунок 10 – Зависимость скорости потока от относительного радиуса при различных расходах для ЦМЭ № 4.1



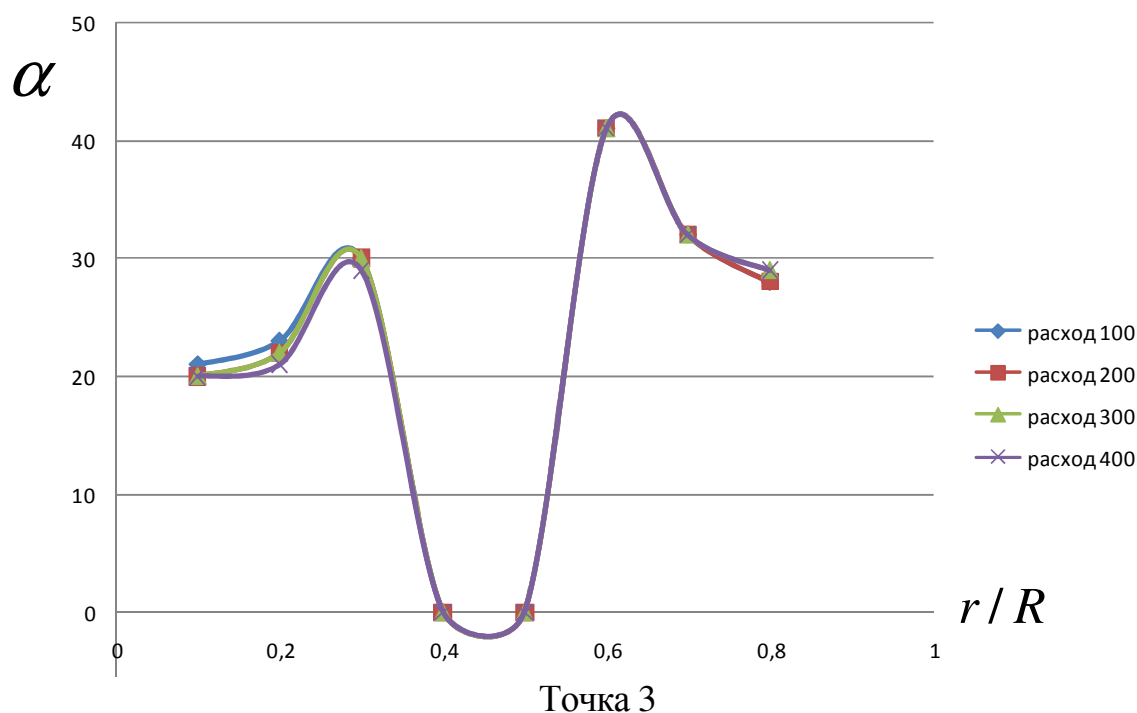
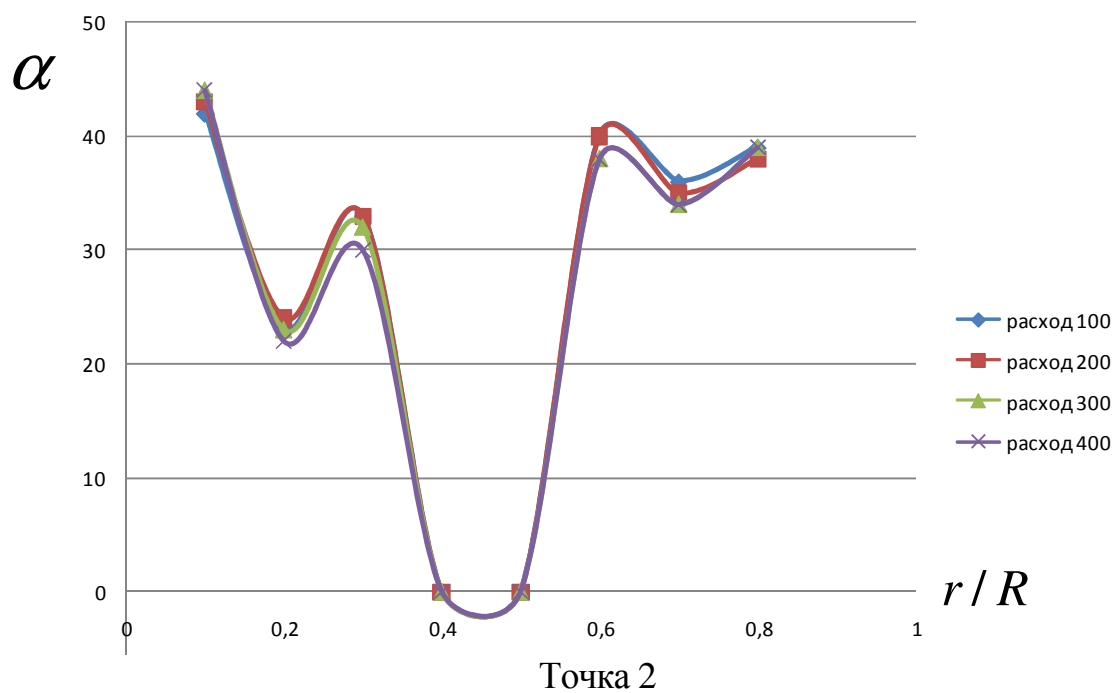


Рисунок 11 – Зависимость угла закрутки потока от расхода по сечению центробежного массообменного элемента № 4.1

В результате проведения экспериментов получены:

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

Из рисунков 10 и 11 видно, что профили скоростей и углов закрутки потока носят подобный характер.

В пятой главе представлена 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 12.

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

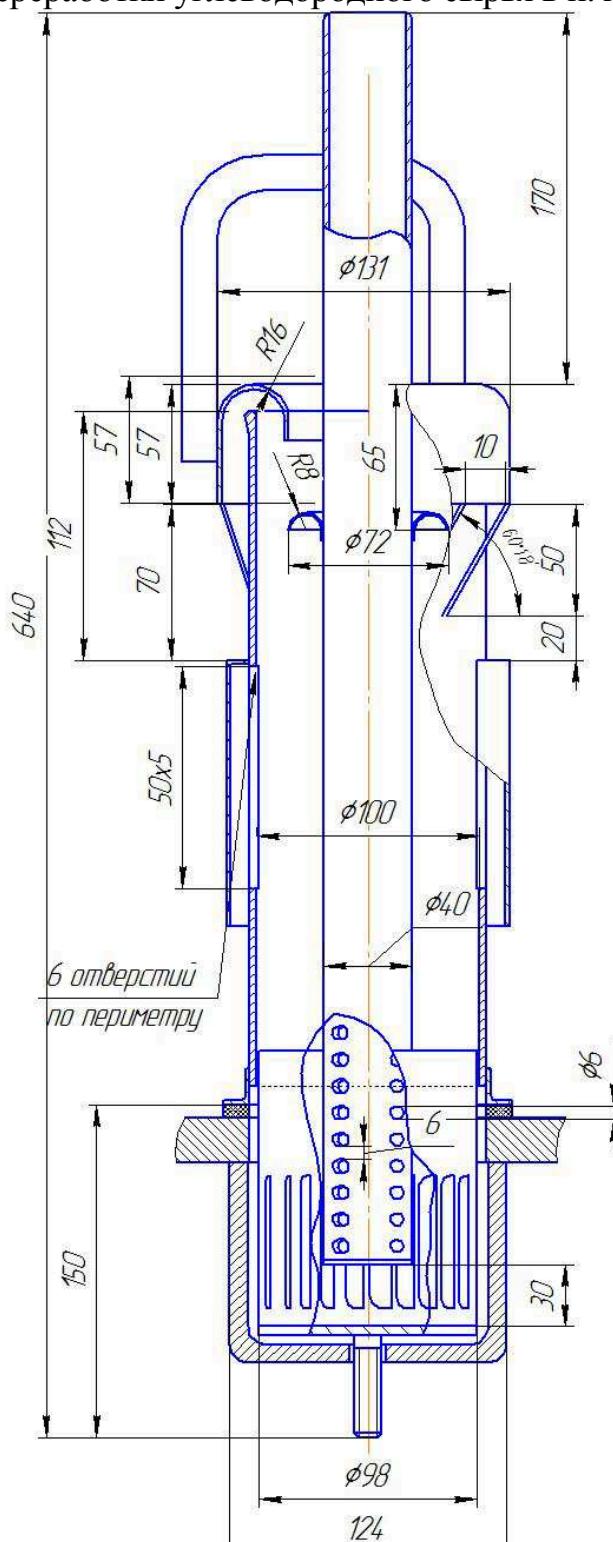


Рисунок 12. Промышленный образец центробежного массообменного устройства.

Принципиальная технологическая схема блока переработки углеводородного сырья представлена на рисунке 13

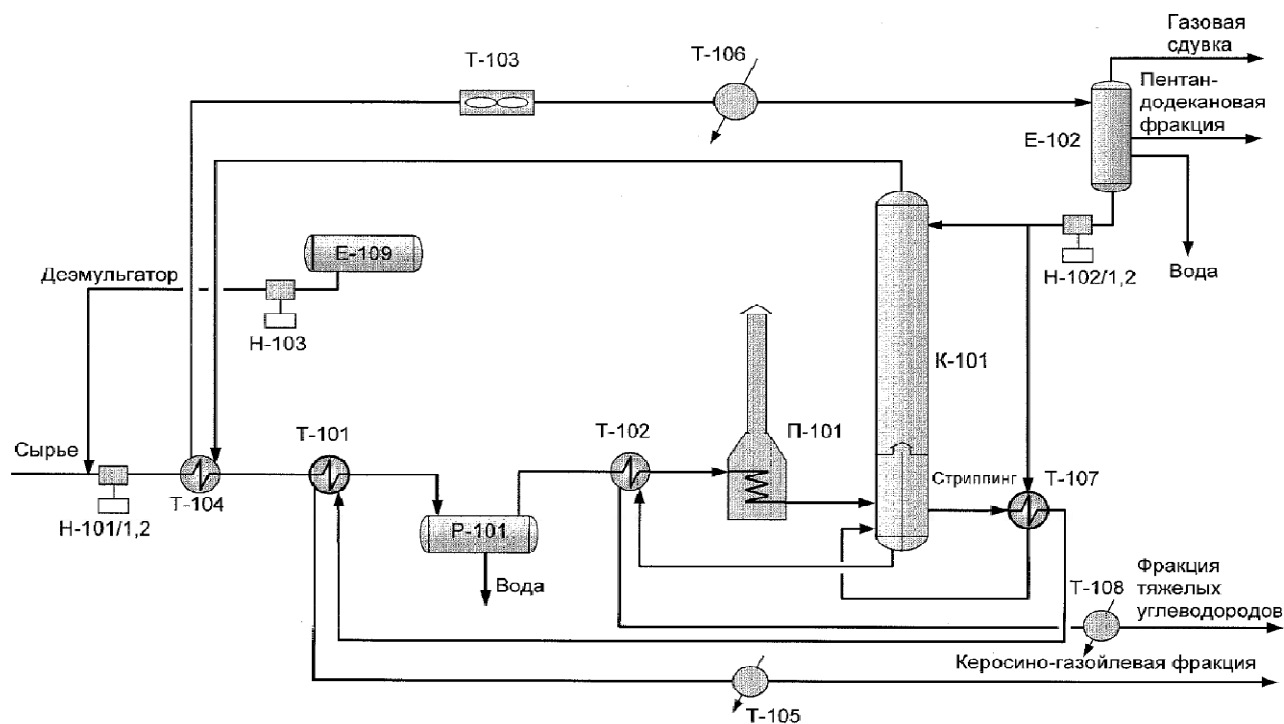


Рисунок 13 - Принципиальная технологическая схема блока переработки углеводородного сырья

Промышленный образец ЦМЭ устанавливался в колонну К-101.

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 14.

Аналогичные исследования проводились и для определения гидравлического сопротивления центробежного массообменного элемента в промышленных условиях. Результаты сравнительного исследования приведены на рисунке 15.

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 обратного 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.

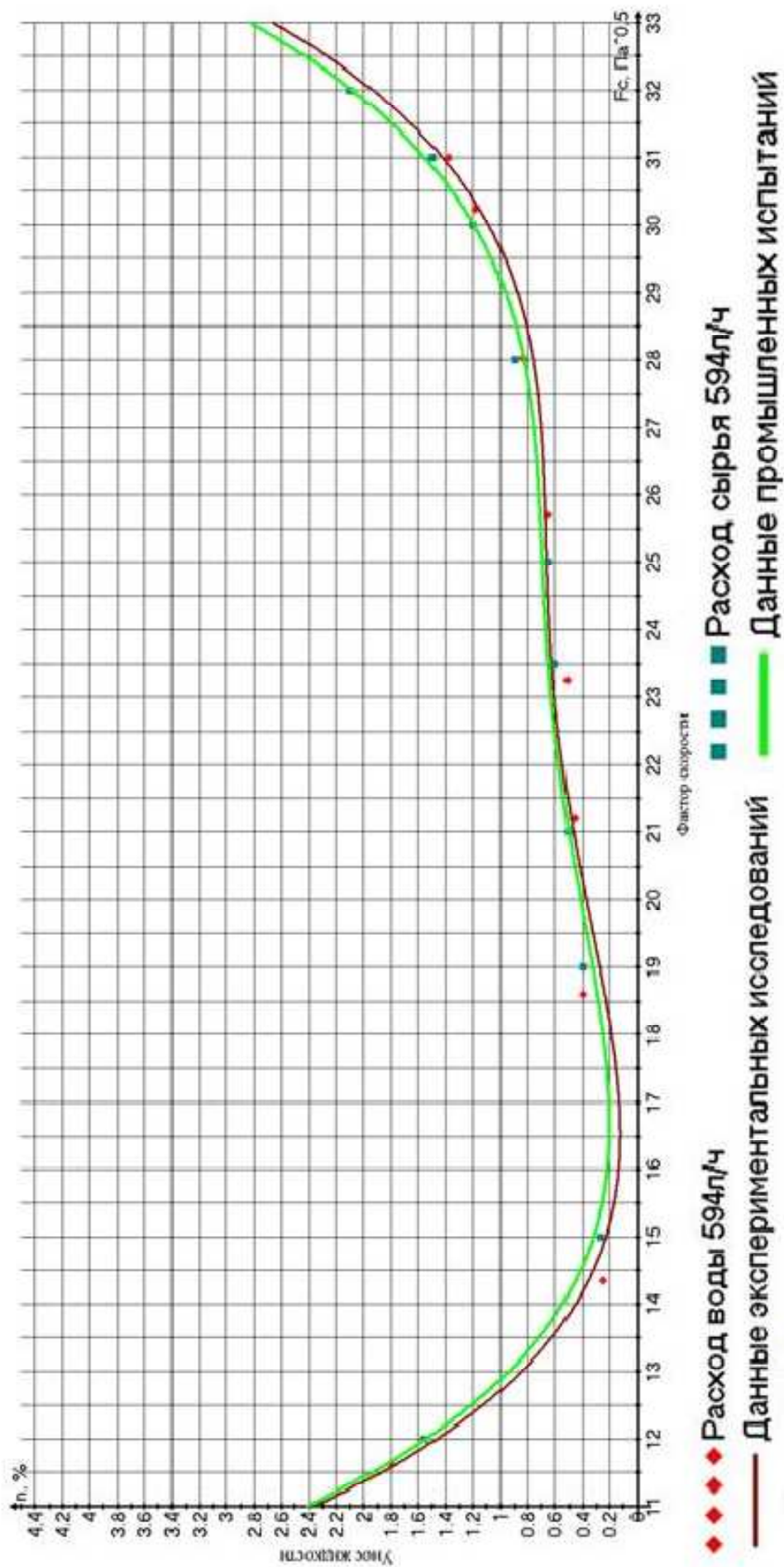
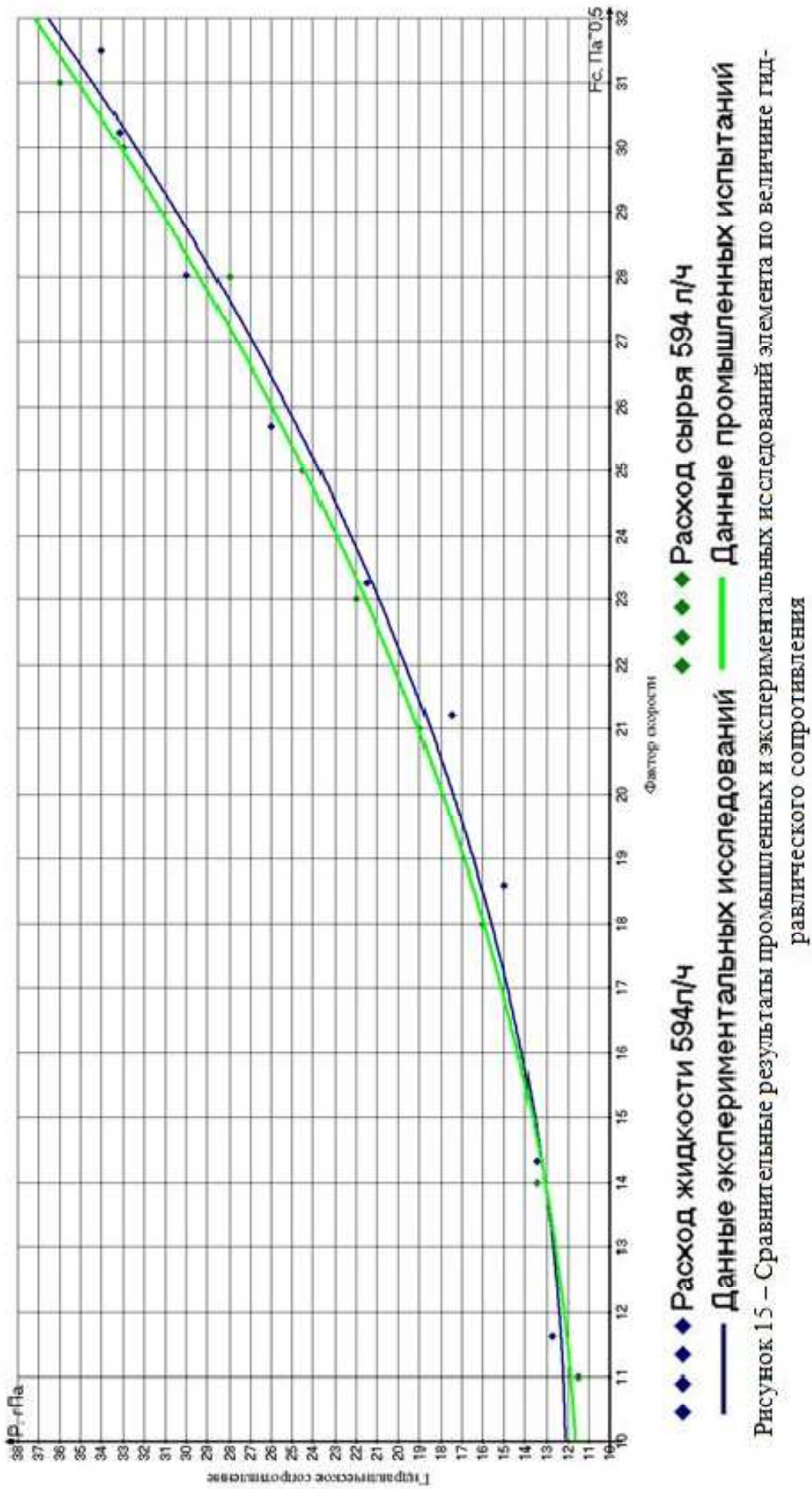


Рисунок 14 – Сравнительные результаты промышленных и экспериментальных исследований элемента по количеству уноса жидкости



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%. Это доказывает точность проведения исследований, а так же подтверждает высокую эффективность разработанной модели.

Выводы по результатам диссертационной работы:

1. На основании поэлементного анализа существующих массообменных устройств разработана принципиальная схема конструкции тарелки с центробежными массообменными устройствами, 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. Получены графоаналитические зависимости гидравлического уноса и сопротивления в центробежном массообменном элементе от фактора скорости газожидкостного потока.

4. 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;

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

6. Автором получена зависимость скорости потока и угла закрутки потока от относительного радиуса центробежного массообменного элемента. Из графиков, полученных в ходе проведения эксперимента 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.

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

**Основные положения и наиболее значимые результаты диссертации
опубликованы в следующих работах**

Рецензируемые журналы, входящие в перечень ВАК при Минобрнауки РФ:

1. Солодовник Д.В. Обзор современных конструкций центробежного массообменного устройства / Солодовник Д.В., Кунина П.С., Бойко С.И. // НТЖ «Нефтепромысловое дело» -2015. -№8.
2. Солодовник Д.В. Очистка газа от мелкодисперсных аэрозолей в центробежном поле, пути повышения эффективности / Солодовник Д.В., Кунина П.С., Бойко С.И. Арестенко А.Ю. // НТЖ «Нефтепромысловое дело» -2015. -№9.

Патенты на полезную модель РФ

1. Солодовник Д.В., Литвиненко А.В., Бойко С.И., Тютюник Г.Г., Грицай М.А., Арестенко А.Ю. Устройство для контакта жидкости и газа: пат. 129408 РФ. №2012155918, заявл. 21.12.2012, зарегистр. 27.06.13
2. Солодовник Д.В., Литвиненко А.В., Бойко С.И., Тютюник Г.Г., Грицай М.А., Арестенко А.Ю. Массообменное устройство: пат. 130230 РФ. №2012155917, заявл. 21.12.2012, зарегистр. 20.07.13.

Статьи в других печатных и электронных научных журналах и тезисы в материалах, трудах международных и всероссийских конференциях:

1. Д.В. Солодовник, С.И. Бойко, П.С. Кунина. Методы интенсификации процессов массообмена на промышленных установках подготовки попутного нефтяного газа. НТЖ «Нефть. Газ. Новации» №5 (172) 2013г.
2. Д.В. Солодовник, С.И. Бойко, П.С. Кунина (ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет») Методы интенсификации процессов массообмена на промышленных установках подготовки попутного нефтяного газа. Сборник докладов Международной научно-практической конференции. г.Сочи, Краснодарский край 25 – 30 марта 2013 г., с.84.
3. Солодовник Д. В. (Кубанский ГТУ, Краснодар, рук. Кунина П. С.). Обзор современной конструкции центробежного массообменного устройства. //Сборник тезисов XVII международной молодежной научной конференции «Севергеоэкотех-2016». 23-25 марта 2016 года. Секция 9. Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности. – УГТУ, 2016г.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,40. Тираж 120 экз.
Заказ № 28 от 14.04.16 г.
Отпечатано в типографии «АДАС»
ИП Сафронович И.А.
с оригинал-макета заказчика.
350000, г. Краснодар, ул. Гоголя, 55.
Тел: (861) 275-02-30