

На правах рукописи



АХМЕТОВ РУСТАМ ФАРИТОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУЙНЫХ АППАРАТОВ
С ЗАКРУЧИВАЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ В ПРОЦЕССАХ
ПОДГОТОВКИ ГАЗА И НЕФТИ К ПЕРЕРАБОТКЕ**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа – 2017

Работа выполнена на кафедре «Нефтехимия и химическая технология»
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Сидоров Георгий Маркелович

Официальные оппоненты: **Лаптев Анатолий Григорьевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Казанский
государственный энергетический
университет» / кафедра «Технология
воды и топлива», заведующий
кафедрой

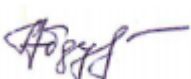
Романова Наталья Александровна
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
горный университет» / кафедра
«Автоматизация технологических
процессов и производств», доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический
университет» (г. Самара)

Защита диссертации состоится 24 мая 2017 года в 14-30 на заседании диссертационного совета Д 212.289.03 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета  **Абдульминев Ким Гимадиевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Актуальность проблемы квалифицированной переработки попутного нефтяного газа (ПНГ) в РФ не теряет своей остроты, что связано с большими потерями и значительными объемами сжигаемого на факелах газа. Для промышленной переработки природных и попутных нефтяных газов необходимо использовать простые, эффективные и дешевые способы. Одним из таких способов является технология на основе вихревых труб Ранка-Хилша. Простота конструкции вихревых труб, их высокая, по сравнению с обычными дросселями, термодинамическая эффективность, а также возможность объединения процесса понижения температуры газа с выделением из него тяжелых углеводородов и влаги дает возможность их использования в условиях промысла. Среди многообразия закручивающих устройств необходимо выделить винтовые закручивающие устройства (ВЗУ). Эти аппараты легко монтируются, упрощают общую геометрию устройства (нет необходимости устанавливать диафрагму), обладают более высокой холодопроизводительностью по сравнению с трубами с тангенциальным закручивающим устройством. Большой интерес вызывают вопросы до- и сверхзвукового течения газа в закручивающем устройстве и вблизи соплового среза закручивающего устройства.

Кроме того, перспективным представляется применение вихревых устройств в процессе обессоливания и обезвоживания нефти перед ее переработкой.

Эффективность этого процесса на установках подготовки нефти напрямую зависит от степени смешения ее с водой и деэмульгаторами. Высокая степень диспергирования воды в нефти достигается в статических смесителях с вихревыми устройствами, где турбулизация и смешение двух жидкостей происходит за счет особой конструкции аппарата. Основными требованиями к статическим смесителям являются низкие потери напора,

высокая степень диспергирования воды, а также простота конструкции и монтажа.

В данной работе рассматриваются два типа аппаратов, использующих энергию струи – вихревые трубы Ранка-Хилша, применяемые в процессах подготовки природных и попутных газов, и статические смесители, которые используются для диспергирования воды в потоке нефти (газоконденсата) при ее промывке на стадии обессоливания.

Степень разработанности

Проблеме совершенствования струйных аппаратов, применяемых в процессах подготовки нефти и газа, посвящены работы многих российских и зарубежных ученых: Мухутдинова Р.Х., Жидкова М.А., Жидкова Д.А., Хафизова Ф.Ш., Хафизова И.Ф., Абдрахманова Н.Х., Пиралишвили Ш.А., Хаита А.В., Орхан Айдин, Целищева А.В., Галиакбарова В.Ф., Жолобовой Г.Н., Галиакбаров Э.В., Смит Е. и др.

Цель работы

Совершенствование струйных аппаратов, таких как: вихревые трубы Ранка-Хилша с винтовым закручивающим устройством и статические смесители для промывки нефти водой, с применением методов вычислительной гидродинамики.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **основных задач**:

1 Обоснование возможности применения средств вычислительной гидродинамики для моделирования течения газа и нефти в струйных аппаратах с закручивающими устройствами.

2 Выполнение количественной оценки конденсации тяжелых углеводородов и воды в пристеночной области вихревых труб.

3 Исследование влияния угла ввода газа в вихревую трубу на положение области инверсии относительно соплового среза закручивающего устройства, ее влияние на холодопроизводительность устройства.

4 Выявление особенностей течения газа в винтовых каналах закручивающего устройства вихревой трубы.

5 Разработка эффективного закручивающего устройства для статического смесителя, отличающегося простотой конструкции и обеспечивающего высокий уровень генерации турбулентной энергии.

Методы решения поставленных задач

Решение поставленных задач выполнено на основе систематизации и анализа литературного материала, компьютерного моделирования работы струйных аппаратов методами вычислительной гидродинамики с последующей оптимизацией их конструкции.

Научная новизна

1 Выявлена зависимость положения области инверсии от угла ввода газа в вихревую трубу и ее влияние на холодопроизводительность.

2 Разработан процесс турбулизации водонефтяной смеси на основе закручивающего устройства с искривлёнными прорезями, позволяющий создать пять динамических вихревых структур.

Положения, выносимые на защиту

1 Результаты численного анализа течения высоконапорного газа в вихревой трубе Ранка-Хилша.

2 Метод оценки степени конденсации тяжелых углеводородов и серосодержащих соединений в пристеночной области вихревой трубы.

3 Анализ влияния положения зоны инверсии на холодопроизводительность вихревой трубы.

4 Результаты опытно-промышленных испытаний статических смесителей.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Указанная область исследований соответствует паспорту специальности 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий», а именно, вопросам совершенствования аппаратного оформления технологических процессов с позиции энерго- и ресурсосбережения,

способам, приемам и методологии исследования гидродинамики движения жидкости, газов.

Практическая ценность работы

1 Выявлены зависимости течения газа в винтовых каналах закручивающего устройства, позволяющие увеличить эффективность работы вихревой трубы за счет более плавного течения газа. Так, увеличение угла ввода газа и тангенциальную его подачу в область перед ВЗУ позволяет уменьшить значение скачка скорости в среднем на 50 м/с и понизить среднюю температуру газа в винтовых каналах на 5-8 °С.

2 Осуществлена модернизация четырех установок обессоливания и обезвоживания нефти ПАО «Татнефть» за счет применения статического смесителя с закручивающим устройством. Это позволило уменьшить содержание хлористых солей в готовой нефти с 75-80 мг/л до 35-40 мг/л, сократить расход пресной воды на обессоливание на 25-30 %.

Вклад соискателя

Состоит в проведении теоретических и численных исследований, обработке и обобщению полученных результатов.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научных конференциях: 64-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ, г. Уфа, 2013; VI Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники», г. Уфа, 2013; Международной научно-практической конференции «Наука и образование в XXI веке», г. Тамбов, 2013; Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности», г. Тамбов, 2014; IV Всероссийской конференции студентов и молодых ученых «Молодежная наука и развитие регионов», г. Березники, 2014; IV Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Экологические проблемы нефтедобычи - 2014», г. Уфа, 2014; VIII Международной научно-

практической конференции молодых ученых, г. Уфа, УГНТУ, 2015; II Научно-технической конференции ПАО АНК «Башнефть», г. Уфа, 2015.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 10 работ: 2 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 2 статьи в прочих журналах и 6 работ в сборниках материалов конференций.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованной литературы, включающей 167 наименований. Работа изложена на 146 страницах текста, содержит 14 таблиц и 101 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, представлены ее научная новизна, практическая значимость и апробация диссертационной работы.

Первая глава посвящена обзору отечественных и зарубежных литературных источников по теме диссертации. Приведена классификация вихревых труб, описаны основные параметры, влияющие на работу. Рассмотрены основные направления совершенствования конструкций струйных аппаратов и области их применения.

Во второй главе рассмотрены методы и объекты исследования. Объектами исследования являлись твердотельные трехмерные модели вихревых труб с винтовыми закручивающими устройствами и статические смесители различных конструкций. Моделирование течения рабочих жидкостей в струйных аппаратах проводилось в программном пакете вычислительной гидродинамики Ansys CFX. Кроме того, во второй главе приводятся основные уравнения используемой математической модели.

В третьей главе рассматриваются особенности течения газа в вихревых трубах Ранка-Хилша и проблемы его математического

моделирования. В качестве исследуемой модели была выбрана проточная часть вихревой трубы с винтовым закручивающим устройством.

Для оценки адекватности математической модели вихревой трубы в Ansys CFX было проведено сравнение результатов численного анализа и результатов экспериментов Мухутдинова Р.Х.¹ в 20 мм вихревой трубе, основные геометрические параметры которой представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Геометрические параметры 20 мм вихревой трубы

Характеристика	Значение
Диаметр камеры энергоразделения, мм	20
Площадь сопла закручивающего устройства, мм ²	36
Диаметр отвода охлажденного газа, мм	9
Угол подачи газа	76
Длина камеры энергоразделения, мм	180

Общее количество элементов неструктурированной тетраэдрической расчетной сетки составило 1,2-1,3 млн. элементов. В камере энергоразделения было построено 6 призматических слоев для более детального разрешения течения газа в пристеночной области.

Качество конечно-элементной расчетной сетки определялось тремя различными способами. Непосредственно после построения качество расчетной сетки может быть определено по показателю Quality, который должен быть больше 0 (в некоторых случаях больше 0,2). Второй способ заключался в автоматическом определении качества сетки по трем показателям решателя CFX (Mesh Orthogonality, Aspect Ratio, Expansion Factor). Третий способ оценки качества расчетной сетки — это ее калибровка. Сущность метода заключается в последовательном увеличении количества ячеек сетки и сравнении значений искомой величины. С уменьшением разницы между результатами расчетов можно судить о постепенном уменьшении погрешности, зависящей от качества сетки.

Турбулентность описывалась стандартной двухпараметрической k-ε моделью. Рабочая среда – воздух. Граничные условия:

¹ Р.Х. Мухутдинов, Р.Я. Амиров, Л.З. Альмеев, М.М. Ханнанов. Эффективность внедрения вихревых аппаратов (применительно к нефтехимическим производствам) / Под общей редакцией Я.С. Амирова. – Уфа: Издательство «Реактив», 2001. – 347 с.

- вход в вихревую трубу – Mass Flow = 0,02 кг/с;
 - «холодный» конец вихревой трубы – Average Static Pressure = 0,1 МПа;

- «горячий» конец вихревой трубы – Average Static Pressure = 0,15 МПа.

Регулировка значения относительной доли холодного потока μ проводилась путем изменения давления на горячем конце вихревой трубы.

По результатам моделирования 20 мм вихревой трубы были построены зависимость изотропного КПД устройства от относительной доли холодного потока, зависимость абсолютного эффекта охлаждения и нагрева газа от относительной доли холодного потока (рисунок 1).

Абсолютные эффекты охлаждения и нагрева определялись по следующим формулам:

$$\Delta T_x = T - T_x \quad (1)$$

$$\Delta T_r = T_r - T \quad (2)$$

где, ΔT_x – абсолютный эффект снижения температуры холодного потока, T – температура сжатого газа, T_x – температура охлажденного газа, ΔT_r – абсолютный эффект повышения температуры подогретого газа.

Изотропный КПД определялся как отношение эффекта охлаждения к эффекту охлаждения при изоэнтропном расширении:

$$\eta = \frac{\Delta T_x}{\Delta T_s} \quad (3)$$

$$\Delta T_s = T \left[1 - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (4)$$

где π – степень расширения газа в вихревой трубе; k – показатель адиабаты.

В дальнейшем исследовалась 30 мм вихревая труба с винтовым закручивающим устройством. Требования к конечно-элементной расчетной сетке оставались такими же, как и в предыдущей серии расчетов. Основные геометрические параметры вихревой трубы представлены в таблице 2

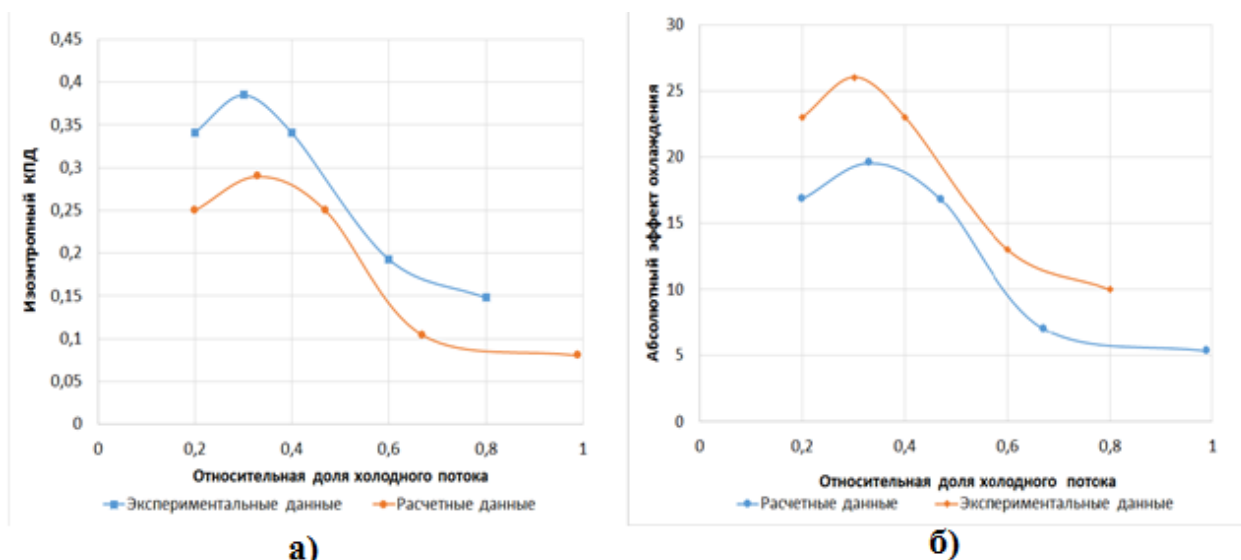


Рисунок 1 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных изоэнтропного эффекта охлаждения (а) и абсолютного эффекта охлаждения (б) от относительной доли холодного потока

Таблица 2 – Геометрические параметры 30 мм вихревой трубы

Характеристика	Значение
Диаметр камеры энергоразделения, мм	30
Площадь сопла закручивающего устройства, мм ²	64
Диаметр отвода охлажденного газа, мм	13
Угол подачи газа	75
Длина камеры энергоразделения, мм	270

На основании CFD-анализа течения газа в вихревой трубе были построены графические зависимости изменения основных термодинамических характеристик по трем сечениям камеры энергоразделения – вблизи соплового среза ВЗУ (сечение А), в середине камеры энергоразделения (сечение Б) и вблизи «горячего» конца устройства (сечение В) (рисунки 2, 3).

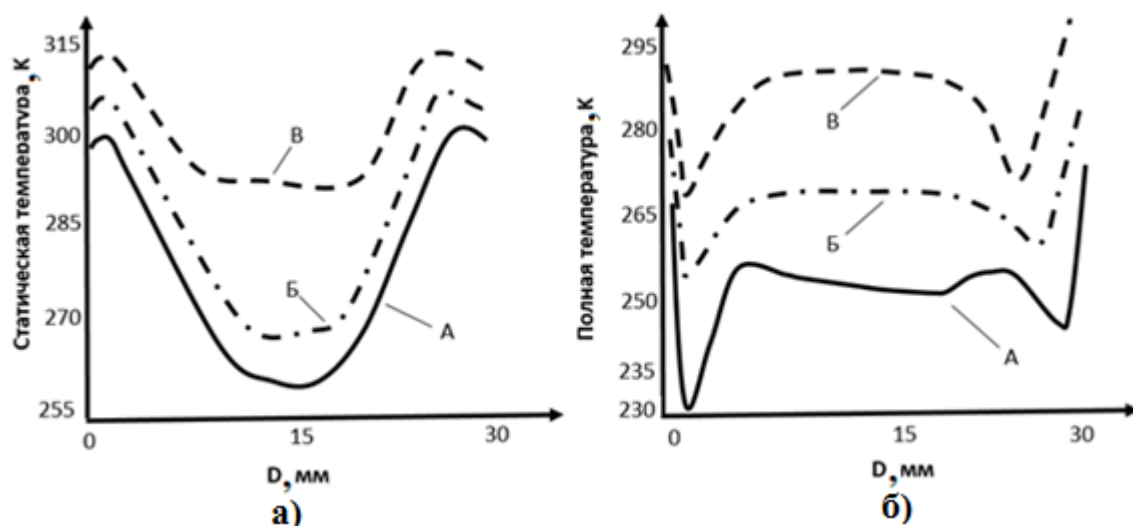


Рисунок 2 – Распределение статической (а) и полной температуры (б) по трем сечениям вихревой трубы при $\mu=0,15$

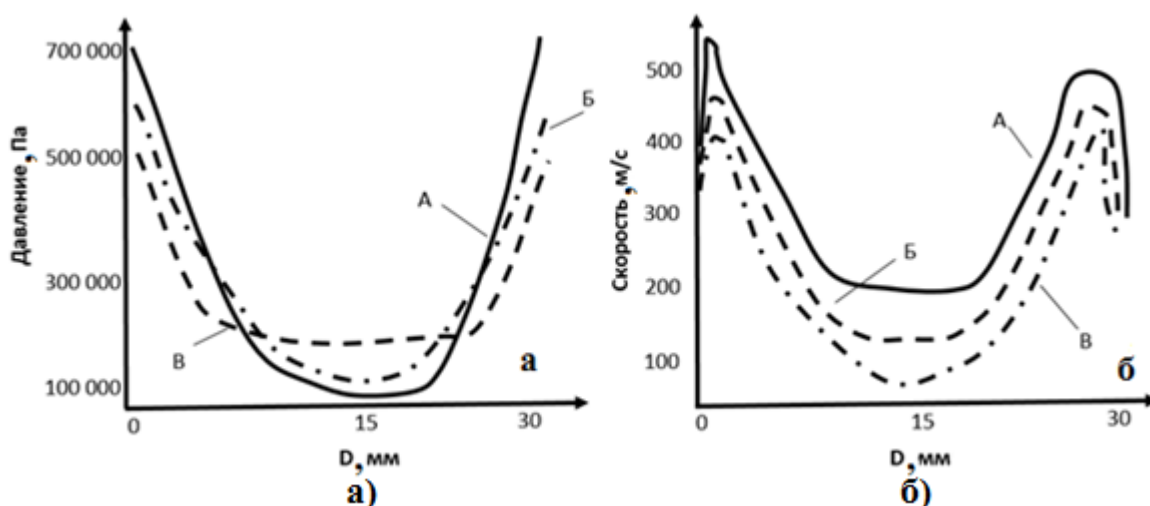


Рисунок 3 – Распределение давления (а) и скорости (б) по трем сечениям вихревой трубы при $\mu=0,15$

Низкие значения термодинамической температуры в пристеночной области вблизи соплового среза способствуют конденсации тяжелых компонентов газовой смеси.

Количественная оценка конденсации тяжелых углеводородов в присопловой зоне проводилась в программном пакете моделирования технологических процессов Honeywell's UniSim[®] Design Suite. Объектом исследования был выбран попутный нефтяной газ с температурой 25 °С и давлением 3 МПа. Состояние системы описывалось моделью Пенг-Робинсон. Процесс конденсации углеводородов моделировался путем уменьшения

температуры и давления смеси. Температура и давления выбирались исходя из значений в пристеночной области (таблица 3 и 4).

Таблица 3 – Состав попутного нефтяного газа при $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0,74\text{ МПа}$ ($\mu=0,2$)

Наименование компонента	Содержание в смеси, мольная доля	Содержание в газовой фазе, мольная доля	Содержание в жидкой фазе, мольная доля	Степень конденсации в жидкой фазе, %
Метан	61,6	61,1	0,6	0,97
Этан	7,7	6,7	1	12,9
Пропан	17,6	8,5	9,1	51,65
Бутан	7,4	0,9	6,5	88,1
Пентан	1,2	0,03	1,2	98,3
Гексан	0,2	0	0,2	100
Гептан	0,03	0	0,03	100
Сероводород	1,4	1,2	0,2	14,3
Углекислый газ	0,2	0,2	0,01	4,4
Вода	2,5	0	2,5	2,5

Таблица 4 – Состав попутного нефтяного газа при $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0,74\text{ МПа}$ ($\mu=0,4$)

Наименование компонента	Содержание в смеси, мольная доля	Содержание в газовой фазе, мольная доля	Содержание в жидкой фазе, мольная доля	Степень конденсации в жидкой фазе, %
Метан	61,7	61,4	0,3	0,43
Этан	7,7	7,3	0,4	5,06
Пропан	17,6	13,3	4,4	24,7
Бутан	7,4	2,5	4,9	66,2
Пентан	1,2	0,1	1,1	90,8
Гексан	0,2	0	0,2	100
Гептан	0,03	0	0,03	96,6
Сероводород	1,4	1,3	0,08	5,9
Углекислый газ	0,2	0,2	0	1,6
Вода	2,5	0	2,5	2,5

Отдельный интерес представляет процесс растворения сероводорода в углеводородном конденсате – с ростом перепада давления и уменьшением температуры в присопловых слоях газа доля растворенного в конденсате сероводорода будет увеличиваться (таблица 3 и 4).

Помимо сероводорода в природных и попутных нефтяных газах содержится значительное количество меркаптанов. Для оценки степени конденсации меркаптанов в исходной смеси сероводород заменялся последовательно на метилмеркаптан, этилмеркаптан и пропилмеркаптан. Температура и давление охлажденной смеси составили соответственно $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$

и 0,74 МПа. Результаты расчета конденсации меркаптанов представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнение степени конденсации меркаптанов в газе

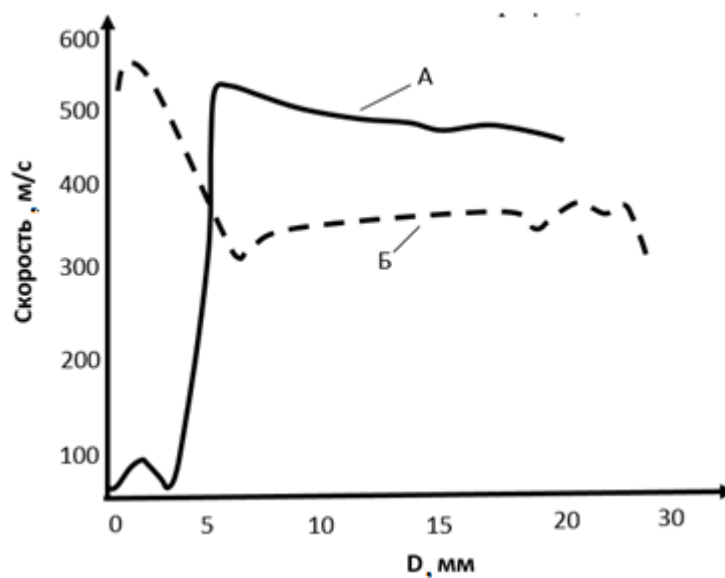
Наименование соединения	Масса компонента в исходной смеси, кг	Масса компонента в охлажденной смеси, кг	Масса компонента в жидкости, кг	Степень конденсации серосодержащего компонента, %
Метилмеркаптан	105,83	25,14	80,69	76,24
Этилмеркаптан	105,83	7,46	98,39	92,97
Пропилмеркаптан	105,83	0,31	105,52	99,7

Таким образом, помимо очистки углеводородных газов от тяжелых компонентов, вихревые трубы могут найти применение в процессе их обессеривания. Описанный выше метод может быть использован для количественной оценки степени конденсации тяжелых углеводородов и серосодержащих соединений в вихревой трубе.

В ВЗУ процесс термической сепарации начинается в винтовых каналах, что следует учитывать при моделировании для адекватного описания масштаба изменения статической температуры. Течение газа в винтовых каналах закручивающего устройство сопровождается рядом особенностей явлений. Во-первых, на входе в ВЗУ возникает застойная зона, вследствие чего возникает неравномерное распределение скорости по высоте канала Y (рисунок 4 А). Во-вторых, на выходе из ВЗУ наблюдается резкий скачок скорости (рисунок 4 Б).

Скачкообразное и неравномерное распределение скоростей в винтовых каналах и на выходе из них приводит к следующим негативным последствиям:

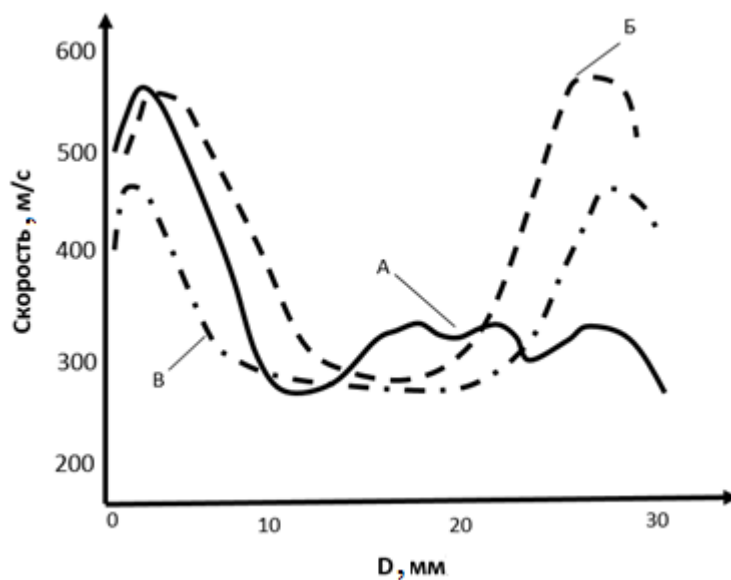
- снижение холодопроизводительности вихревой трубы из-за потерь энергии движения газа;
- неравномерное распределение полей температур и давлений из-за скачкообразного распределения скоростей, что также негативно сказывается на процессе образования пленки конденсата в пристеночной области.



А – Неравномерное распределение скорости газа по высоте винтового канала;
 Б – Скачкообразное увеличение скорости на выходе газа из ВЗУ

Рисунок 4 – Неравномерное распределение скорости газа в ВЗУ

Постепенное увеличение угла ввода газа от 65° до 75° показало уменьшение скачка скорости газа на выходе из сопла (рисунок 5), а также увеличение холодильного эффекта ВТ (рисунок 6).



A – 65° ; B – 70° ; B – 75°

Рисунок 5 – Сравнение поля скоростей вблизи соплового среза при различных углах ввода газа в ВЗУ

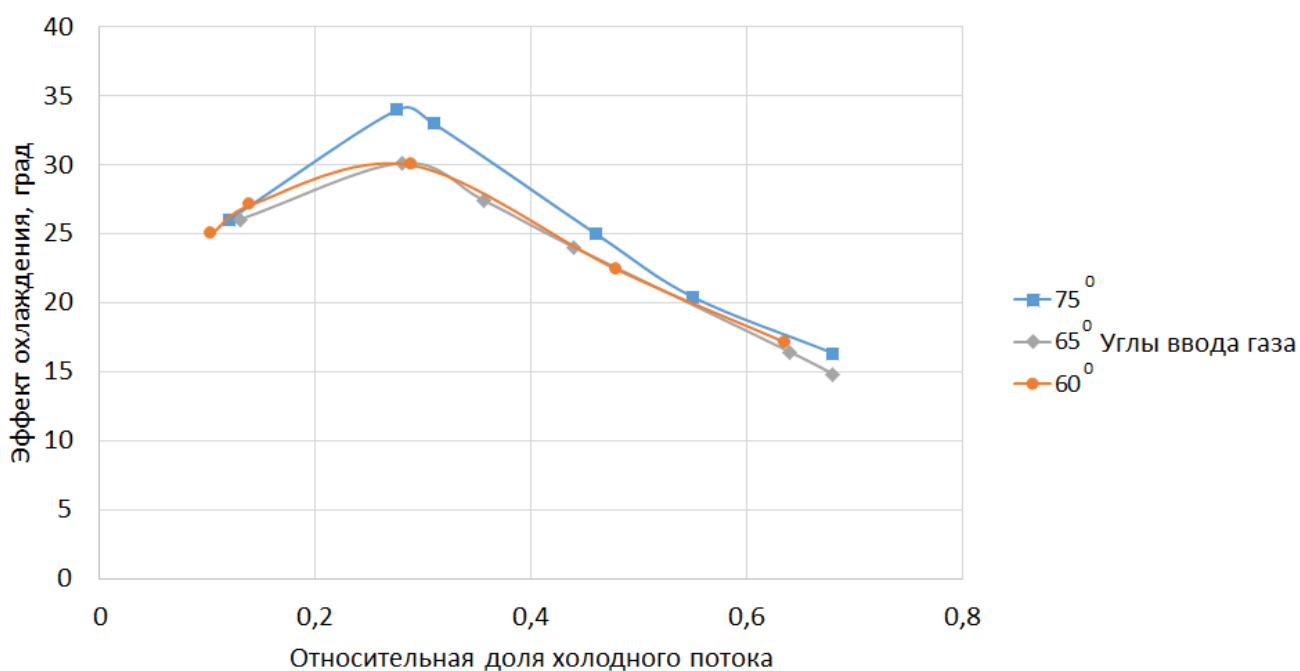


Рисунок 6 – Сравнение зависимости эффекта охлаждения от относительной доли холодного потока

С изменением угла ввода меняется не только холодильный эффект, но и структура течения газа в приосевой области. С уменьшением угла ввода увеличивается доля газа, уходящего из приосевых областей в сторону «холодного» конца вихревой трубы, тем самым смещается и область инверсии в сторону соплового входа. Область инверсии – область в камере энергоразделения, в которой происходит формирование «внутреннего» вихря. Расположение области инверсии зависит от геометрии закручивающего устройства и режима работы вихревой трубы.

Исходя из теории о природе эффекта Ранка-Хилша как о взаимодействии двух вихрей с передачей тепла от одного к другому, следует, что приближение области инверсии к сопловому входу уменьшает эффект охлаждения вихревой трубы вследствие уменьшения степени взаимодействия двух вихрей.

Уменьшения застойной зоны на входе в вихревую трубу можно добиться путем ввода газа в вихревую трубу тангенциально (рисунок 7, а) таким образом, чтобы газ начинал свое круговое движение до входа в

винтовые каналы ВТ. Таким образом, удастся уменьшить негативное влияние острой кромки входа в винтовые каналы (рисунок 7, б).

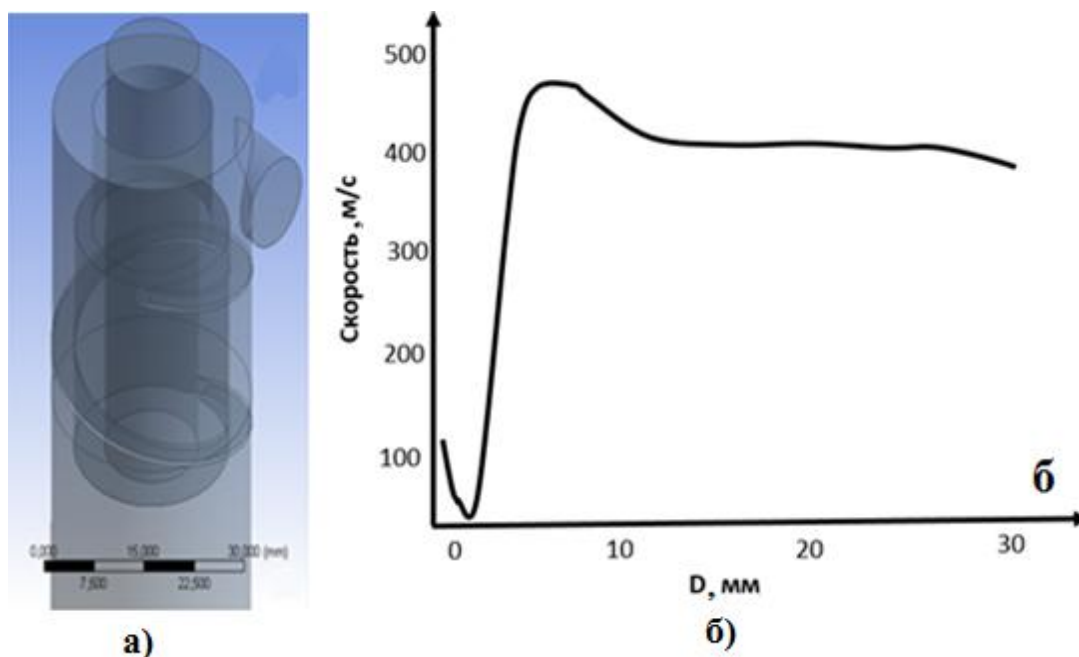


Рисунок 7 – Схема тангенциальной подачи газа (а) и зависимость изменения скорости газа по высоте винтового канала (б)

В четвертой главе рассматривается процесс смешения нефти с водой в различных конструкциях статических смесителей.

Симуляция двухфазного течения проводилась в программном комплексе Ansys CFX. Моделирование проводилось с использованием тетраэдрической сетки с призматическим слоем элементов в пристеночной области. Качество расчетной сетки исследовалось теми же способами, что и в предыдущей главе. Общее число элементов составило примерно 1,5 млн. единиц. Турбулентность описывалась стандартной двухпараметрической k-ε моделью. Двухфазное течение воды и нефти описывалось Эйлер-Эйлеровской моделью.

В качестве исследуемых моделей было выбрано три типа смесителей:

- смеситель типа СНВ-200 без закручивающего устройства (устройство №1);
- смеситель типа СНВ с закручивающим устройством (устройство №2);

- смеситель с лопастным закручивающим устройством (устройство №3).

CFD-анализ устройства №1 показал низкую степень турбулизации потока нефти (0,0066 Дж/кг) и осаждение диспергируемой воды на дне смесителя (рисунки 8, 9).

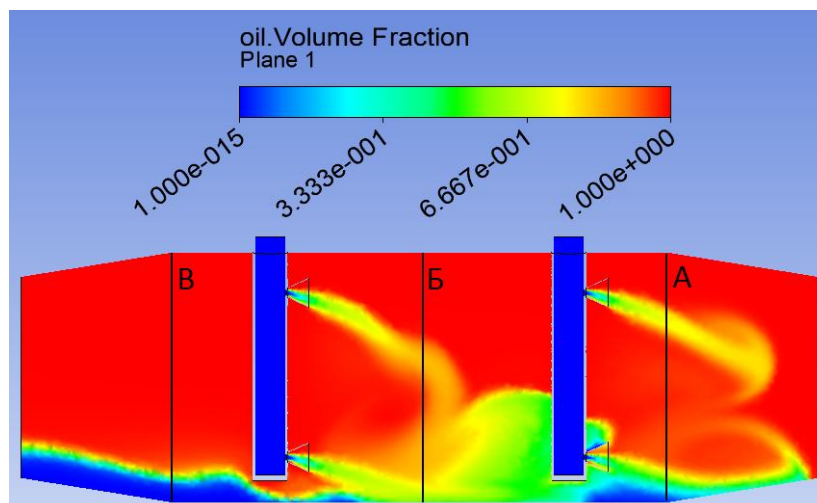


Рисунок 8 – Распределение объемной доли нефти в устройстве №1

Очевидно, что для интенсивного перемешивания необходима высокая степень турбулизации потока нефти, которая может быть достигнута путем изменения структуры потока различными перемешивающими устройствами.

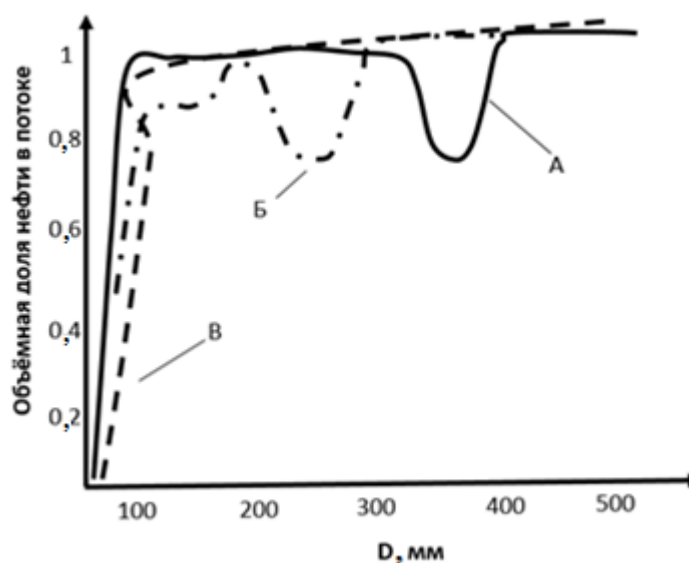


Рисунок 9 – Распределение объемной доли нефти по трем сечениям устройства №1

Устройство №2 работает следующим образом: нефть турбулизуется в закручивающемся устройстве с тангенциальными прорезями, после чего закрученная струя расширяется в диффузоре и соударяется со струей пресной воды, подаваемой из распылительных сопел, расположенных соосно с закручивающим устройством. Средняя генерация турбулентной энергии почти в 100 раз выше, чем в устройстве №1, и равна 0,46 Дж/кг.

Несмотря на высокую степень диспергации воды в нефти в устройстве № 2, оно отличается рядом недостатков: сложностью конструкции, необходимостью обеспечения соосного расположения распылителя воды, а также возможной закупоркой сопел подачи воды механическими примесями нефти (рисунки 10, 11).

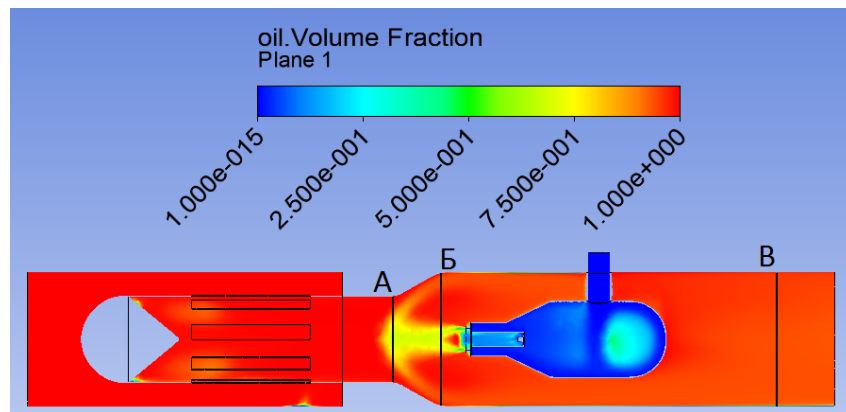


Рисунок 10 – Распределение объемной доли нефти в устройстве №2

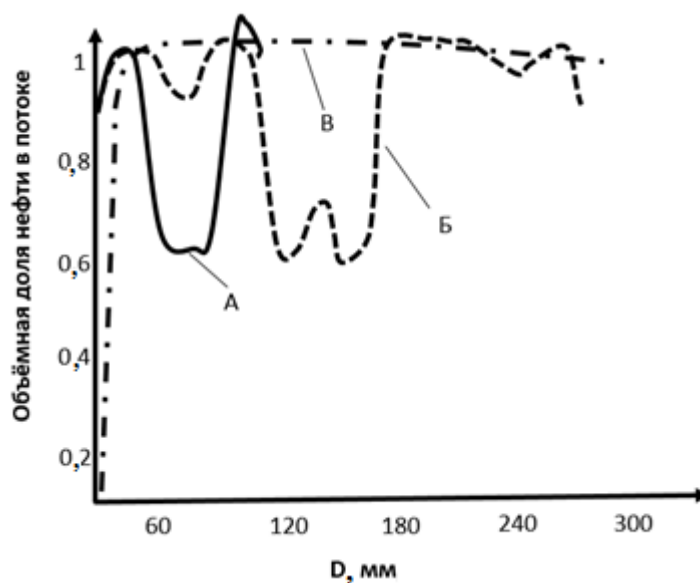


Рисунок 11 – Распределение объемной доли нефти по трем сечениям устройства №2

В устройстве №3 турбулизация потока происходит за счет закрутки потока вокруг своей оси, так и за счет его ускорения в конфузоре, где расположены сопла подачи воды (рисунки 12, 13).

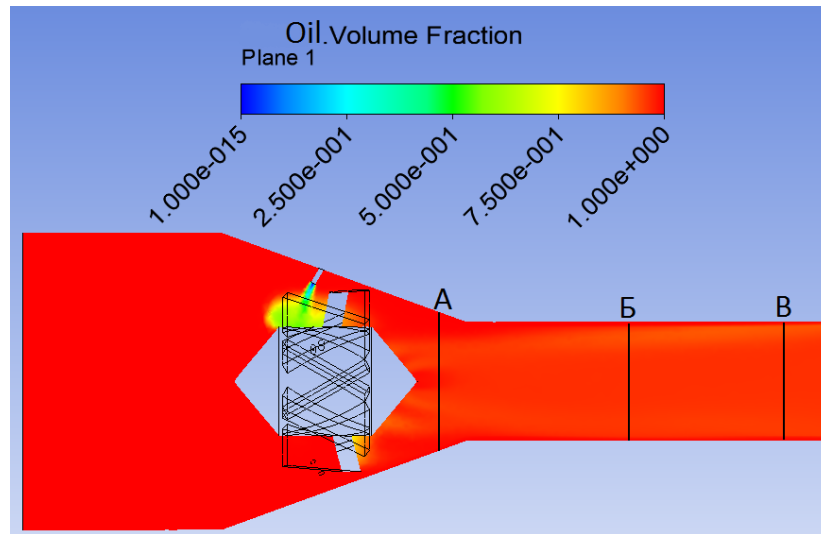


Рисунок 12 – Распределение объемной доли воды в устройстве №3

Средний уровень генерации турбулентной энергии в устройстве №3 равен 0,3 Дж/кг. К недостаткам устройства №3 можно отнести:

- высокую вероятность налипания механических примесей на лопастях закручивающего устройства и их деформация;
- необходимость расположения лопастного закручивающего устройства строго по оси смесителя, что значительно усложняет его монтаж.

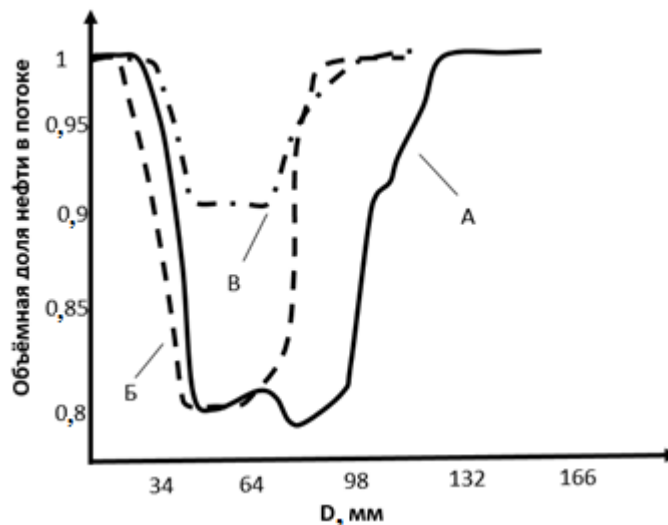


Рисунок 13 – Распределение объемной доли нефти по трем сечениям в устройстве №3

Исходя из основных достоинств и недостатков устройств №1–3 было **разработано** закручивающее устройство (рисунок 14), позволяющее как ускорять поток нефти, так и создавать в нем вихревые структуры.

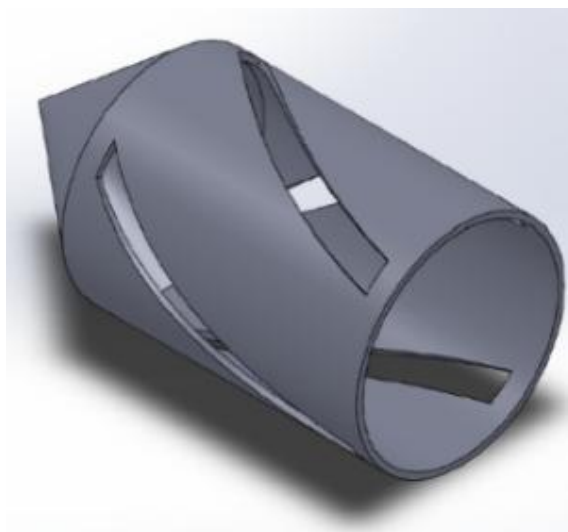


Рисунок 14 – Твёрдотельная модель закручивающего устройства с искривленными прорезями

Закручивающее устройство представляет собой полый цилиндр с глухим концом и искривленными прорезями.

Особенностью течения нефти в закручивающем устройстве является образование 5 вихрей – 4-х по периферии и одного в центре (рисунок 15). Причем периферийные вихри не статичны, а движутся по окружности, тем самым увеличивая степень диспергации воды и степень ее турбулизации.

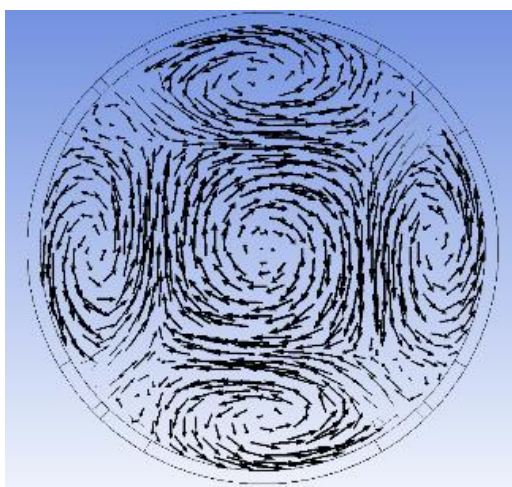


Рисунок 15 - Векторное поле скоростей в закручивающем устройстве с искривленными прорезями

Средний уровень генерации турбулентной энергии составил 0,96 Дж/кг. Следует отметить, что если смешение нефти будет проходить после закручивающего устройства, то диспергация воды в потоке нефти происходит неравномерно. Это связано с тем, что развитая вихревая структура разрушается при достижении сопел подачи воды, а также с нечетным количеством сопел.

На основе разработанного устройства была предложена конструкция статического смесителя с подачей воды перед закручивающим устройством и емкостью подачи воды (рисунки 16, 17).

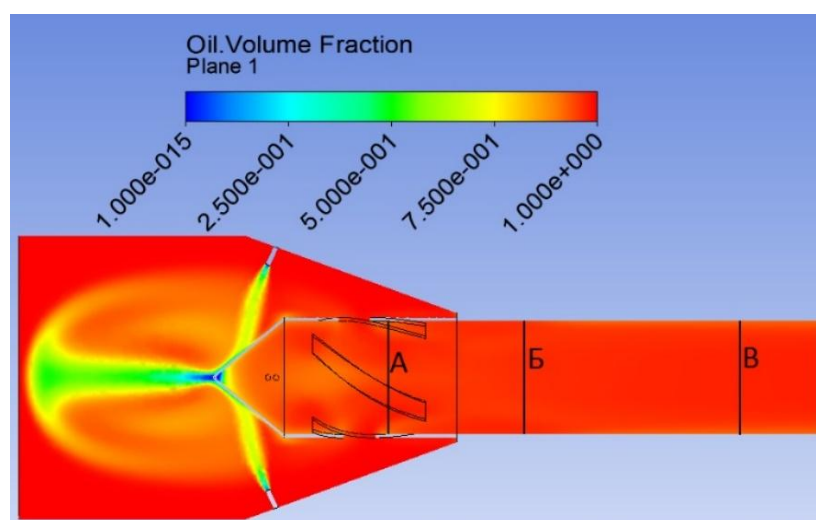


Рисунок 16 – Распределение объемной доли нефти в статическом смесителе с подачей воды перед закручивающим устройством

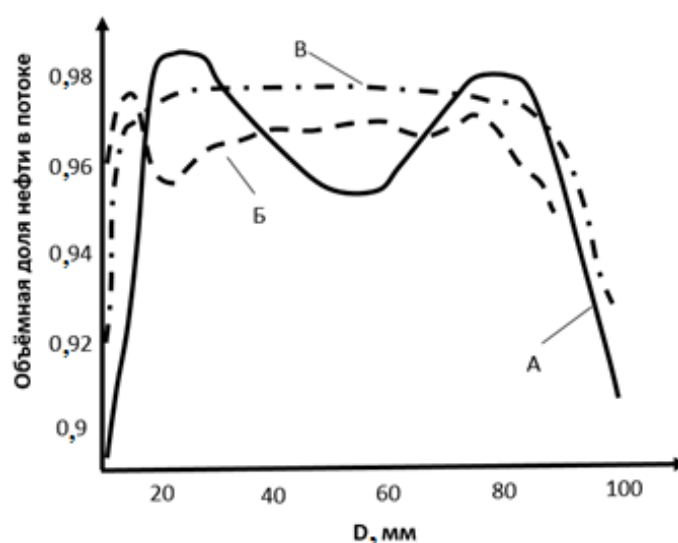


Рисунок 17 – Распределение нефти по трем сечениям статического смесителя с подачей воды перед закручивающим устройством

Промышленные испытания предложенного статического смесителя были проведены на предприятии НГДУ «Бавлынефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина. Эффективность внедрения оценивалась путем сравнения содержания солей в нефти до и после ее подачи на электрообессоливающую установку. Пробы отбирались каждые 4 часа. Концентрация хлористых солей на входе в блок обессоливания колебалась в пределах от 650 мг/л до 1150 мг/л, на выходе концентрация хлористых солей понижалась до 33-61 мг/л, т.е. степень обессоливания колебалась в пределах 82-97 %. При этом до реконструкции и установки предложенных смесителей на выходе с блока обессоливания содержание хлористых солей колебалось в пределах от 90 до 120 мг/л при тех же исходных концентрациях соли на входе в установку, т.е. степень обессоливания составляла примерно 72-83 %. Так же необходимо отметить уменьшение потребления воды на промывку нефти на 25-30 %.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1 Сравнение опытных и расчетных характеристик исследуемых объектов, а также результаты калибровки конечно-элементных сеточных моделей показали достаточно высокую сходимость результатов моделирования струйных аппаратов средствами вычислительной гидродинамики.

2 Показана зависимость количества сконденсировавшихся тяжелых углеводородов и воды в пристеночной области вихревой трубы в зависимости от величины относительной доли холодного потока. Увеличение относительной доли холодного потока μ способствует увеличению статической температуры на выходе из ВЗУ с 230 К при $\mu=0,15$ до 263 К при $\mu=0,7$. Кроме того, наличие низких статических температур (230-270 К) в винтовых каналах закручивающего устройства, способствует началу конденсации непосредственно в закручивающем устройстве. При этом помимо очистки газа от тяжелых углеводородов и влаги происходит его

очистка от серосодержащих соединений вследствие их растворения в углеводородном конденсате.

3 Наибольшее удаление области инверсии от соплового среза, а соответственно и наибольший эффект охлаждения (34°), наблюдается при максимально возможном значении угла ввода газа β (75°). Также показано, что положение области инверсии относительно соплового среза определяет холодопроизводительность вихревой трубы.

4 Течение газа в каналах ВЗУ сопровождается образованием застойной зоны на входе и резкого скачка скорости на выходе. Для создания плавного течения газа в винтовых каналах ВЗУ необходимо добиться максимального значения угла ввода газа β . Уменьшить застойную зону на входе в винтовые каналы можно путем тангенциальной подачи газа в зону перед ВЗУ. При этом уменьшение застойной зоны на входе в винтовые каналы закручивающего устройства понижает среднюю температуру газа в среднем на $5-8^\circ\text{C}$.

5 По результатам численного анализа ряда конструкций статических смесителей предложена конструкция закручивающего устройства с искривленными прорезями для статического смесителя. Искривленные прорези закручивающего устройства не только увеличивают степень турбулентности потока нефти, но и создают несколько подвижных вихревых структур, которые постепенно затухают при движении по смесительной части трубопровода. Опытные промышленные испытания смесителя показали увеличение процента обессоливания нефти (до 97%), что подтверждает точность математической модели статического смесителя.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих научных трудах:

в изданиях рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1 Ахметов Р.Ф. Анализ способов переработки попутного нефтяного газа / Р.Ф. Ахметов, Г.М. Сидоров, М.Н. Рахимов, Р.Р. Шириязданов, А.Р. Давлетшин, Э.Г. Теляшев, Каримова А.Р. // Наука и техника в газовой промышленности, 2015, № 1 (61), С. 38-44.

2 Ахметов Р.Ф. Совершенствование процесса выделения бензиновых фракций из попутного нефтяного газа с применением эффекта Ранка-Хилша / Р.Ф. Ахметов, Г.М. Сидоров, Ф.Ш. Вильданов, В.О. Беркань // Башкирский химический журнал, 2015, Т. 22, № 3, С. 73-78.

в других изданиях

3 Ахметов Р.Ф. Совершенствование конструкции винтового закручивающего устройства методом CFD-анализа /Р.Ф. Ахметов, Г.М. Сидоров, М.Н. Рахимов, В.О. Беркань // Фундаментальные исследования, 2015, № 11-4, С. 647-653.

4 Ахметов Р.Ф. Усовершенствование схемы фракционирования попутного нефтяного газа / Р.Ф. Ахметов, Е.В. Герасимова, Г.М. Сидоров, А.В. Евтюхин // Современные проблемы науки и образования, 2015, № 1-1, С. 400.

5 Ахметов Р.Ф. Химическая переработка ПНГ / Р.Ф. Ахметов, Г.М. Сидоров, Р.Д. Ильин // Молодежная наука в развитии регионов: Материалы IV Всероссийской конференции студентов и молодых ученых, 2014, Березники, С. 248.

6 Ахметов Р.Ф. Некоторые особенности стабилизации нефти / Р.Ф. Ахметов, Г.М. Сидоров, А.З. Галиуллин // Наука и образование в XII веке: Материалы Международной научно-практической конференции, 2013, Тамбов, С. 17-18.

7 Ахметов Р.Ф. Подготовка нефти на промыслах // Инновационные технологии в области химии и биотехнологии: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, 2012, Уфа, С. 178-179.

8 Ахметов Р.Ф. Обезвоживание нефти на промыслах. Высокие технологии в современной науке и технике: Материалы II Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием, 2013, г. Томск, С. 20-21.

9 Ахметов Р.Ф. Использование эффекта Ранка-Хильша в процессе фракционирования попутного нефтяного газа / Р.Ф. Ахметов, Г.М. Сидоров, Р.Д. Ильин // Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности, 2014, Тамбов, С. 13.

10 Ахметов Р.Ф. Использование вихревого эффекта в процессах утилизации попутного газа / Р.Ф. Ахметов, Г.М. Сидоров // Экологические проблемы нефтедобычи – 2014: Материалы IV Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодежи, 2014, Уфа, С. 102-103.