

*На правах рукописи*



МАННАНОВ ТИМУР ИЛЬНУРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
УСТРОЙСТВ ВВОДА СЫРЬЯ И КАПЛЕОТБОЙНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ  
КОЛОННОГО И СЕПАРАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

2.6.13. – Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Уфа – 2023

Работа выполнена на кафедре «Нефтехимия и химическая технология» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель	доктор технических наук, доцент <b>Чуракова Светлана Константиновна</b>
Официальные оппоненты:	<b>Голованчиков Александр Борисович</b> доктор технических наук, профессор Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» / кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», профессор  <b>Кораблева Ольга Николаевна</b> кандидат химических наук, доцент Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет» / кафедра «Химическая технология органических веществ», доцент
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

Защита диссертации состоится «25» октября 2023 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.428.02 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Бадикова Альбина Дарисовна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Процессы фракционирования являются основными процессами разделения смесей в нефте- и газоперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Важнейшим фактором эффективного фракционирования, помимо работы внутренних контактных устройств, является сепарация паро-жидкостного потока в зоне ввода сырья в колонну, а также в зоне вывода парового потока в верхней части колонны. Однако, при проектировании колонного оборудования уделяется недостаточное внимание оценке влияния гидродинамической составляющей на эффективность процессов сепарации в этих зонах ректификационных колонн.

Каплеотбойные устройства устанавливаются для снижения каплеуноса над зонами питания, в зоне вывода верхнего продукта ректификационных колонн и в сепараторах. Ужесточение требований к содержанию капельной жидкости в газах сепарации делает актуальной проблему разработки более эффективных каплеотбойников и получения надежной расчетной модели каплеотбойных устройств для ректификационных колонн и сепараторов.

Оценка гидродинамической составляющей сепарационных и отбойных устройств не проводится в существующих программах технологического моделирования (HYSYS, Unisim Design и т.д.), в связи с чем представляет интерес решение задачи разделения двухфазного паро-жидкостного потока методами вычислительной гидродинамики (CFD).

### **Степень разработанности темы исследования**

Проблеме исследования устройств ввода сырья, сепарационных и каплеотбойных устройств посвящены работы зарубежных и отечественных ученых: М. Wehrli, Ž. Olujić, М. Pilling, Н. Bansal, М. Naghshenasfard, Л.М. Мильштейн, В.А. Толстов, П.П. Слугин, С.И. Бойко и др.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствует формуле специальности 2.6.13: совершенствование аппаратного оформления

технологических процессов с позиций энерго- и ресурсосбережения. Область исследования: исследование гидродинамических процессов в колонных и сепарационных технологических аппаратах.

**Целью диссертационной работы является** исследование гидродинамических характеристик сепарационных и отбойных устройств и разработка технических решений по совершенствованию их конструктивного оформления.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Исследование методом CFD-анализа гидродинамических характеристик устройств ввода сырья в колонный аппарат и определение диапазона их эффективного применения.

2. Разработка конструктивных решений для повышения эффективности работы устройств ввода сырья.

3. Исследование методом CFD-анализа гидродинамических характеристик одноступенчатых насадочных каплеотбойных устройств противоточной и перекрестноточной конфигураций.

4. Определение гидродинамических характеристик и диапазона эффективной работы одноступенчатых противоточных и перекрестноточных однополосных насадочных каплеотбойных устройств.

#### **Научная новизна**

1. Предложены критерии оценки работы устройств ввода сырья: критерии высоты сепарационной зоны и высоты зоны распределения парового потока.

2. Для различных конструкций устройств ввода сырья отбойного и лопастного типа методом CFD-моделирования: определён диапазон эффективного применения, определено влияние доли отгона сырья на критерии их работы.

3. Для лопастных устройств ввода сырья получены зависимости критерия высоты сепарационной зоны от конструктивных параметров при различных критериях Вебера.

4. Для одноступенчатых насадочных каплеотбойных устройств противоточного и перекрестноточного типов (конфигурация «одна полоса»)

методом математического и физического моделирования определен диапазон эффективной работы при различных удельных нагрузках.

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

Проведен сравнительный анализ конструкций отбойных и лопастных устройств ввода сырья с применением методов CFD-моделирования гидродинамики. На различных модельных смесях оценено влияние доли уноса жидкости из парожидкостного потока в зоне питания на энергозатраты процесса ректификации. Показаны диапазоны применения отбойных и лопастных устройств ввода сырья, даны рекомендации по выбору устройств ввода сырья.

Определены коэффициенты местных сопротивлений рассматриваемых устройств ввода сырья. Получены эмпирические уравнения зависимости высоты сепарационной зоны от конструктивных параметров лопастного устройства ввода сырья: ширина лопасти, расстояние между лопастями.

Показано, что при увеличении доли отгона сырья увеличивается эффективность сепарации, уменьшается высота сепарационной зоны и гидравлическое сопротивление.

Разработаны две принципиально новые конструкции устройства ввода сырья, имеющие два направляющих канала по ходу потока (V-образного типа и V-образного типа с тангенциальными элементами на каналах), которые позволяют увеличить эффективность сепарации при высоких скоростях подачи сырья. Получены патенты на изобретение № 2773283 и на полезную модель №211921.

Определен диапазон работы противоточного и перекрестноточного насадочного каплеотбойника в зависимости от скорости поступающего потока с применением методов CFD-анализа. Для углеводородных сред диапазон удельной нагрузки по газу противоточного каплеотбойника от 0 до 2,1 Па<sup>0,5</sup>, для перекрестноточного каплеотбойника диапазон от 0 до 4,2 Па<sup>0,5</sup>, т.е. больше в 2 раза. По результатам работы разработана программа для подбора насадочных каплеотбойников с учетом минимизации затрат на установку каплеотбойника, получено свидетельство о регистрации программы на ЭВМ № 2021613501. Разработана методика «Определение капельного уноса жидкости с газом

сепарации», примененная для определения каплеуноса на двух объектах. Получен акт внедрения.

### **Методология и методы исследования**

Решение поставленных задач осуществлялось на основе: исследования гидродинамики двухфазных потоков в лопастных и отбойных устройствах ввода сырья, в насадочных каплеотбойных устройствах методом CFD-анализа, экспериментальных стендовых испытаний насадочных каплеотбойных устройств.

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

1. Критерии оценки, результаты численных исследований отбойных и лопастных устройств ввода сырья, диапазоны их эффективной работы.
2. Зависимость критериев высоты сепарационной зоны и гидравлического сопротивления от конструктивных параметров лопастей (ширина, количество, угол поворота) лопастных устройств ввода сырья.
3. Технические решения по совершенствованию одноканального лопастного устройства ввода сырья за счет применения двухканального лопастного устройства ввода сырья V-образного типа и V-образного типа с тангенциальными элементами.
4. Результаты численных исследований одноступенчатых насадочных каплеотбойных устройств противоточного и перекрестноточного типа (конфигурация «одна полоса»).

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

Достоверность результатов обосновывается применением известных физических закономерностей, применением специализированного программного обеспечения, высокой воспроизводимостью полученных экспериментальных данных.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научных конференциях: Всероссийская научно-практическая конференция «Новые направления работ на нефть и газ, инновационные технологии разработки их месторождений, перспективы добычи нетрадиционного углеводородного сырья», Оренбург, Волго-Уральский НИПИ нефти и газа, 2019 г.; III, IV, VI Международная

научно-практическая конференция «Булатовские чтения», Краснодар, 2019, 2020, 2022 г.; XIV Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники – 2021», Уфа, УГНТУ, 2021 г., VI Международная научная конференция «Теория и практика массообменных процессов химической технологии (Марушкинские чтения)», Уфа, УГНТУ, 2021 г., II Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и направления развития технологий органического и неорганического синтеза в условиях импортозамещения», Стерлитамак, УГНТУ, 2022 г., Международная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию начала добычи первой башкирской нефти, Уфа, УГНТУ, 2022 г.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 18 работ, в том числе: 3 статьи в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, включая 2 статьи, входящих в международную базу Scopus, 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 1 учебное пособие, 11 материалов в сборниках трудов конференции.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 141 наименований. Работа изложена на 164 страницах, содержит 31 таблицу и 91 рисунок.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, показаны ее научная и практическая значимость, сформулированы основная цель и задачи исследования.

**В первой главе** приведен обзор и анализ существующих устройств ввода сырья, работ по моделированию гидродинамики устройств ввода сырья, а также каплеотбойных устройств. По результатам литературного обзора показано отсутствие обобщенных теоретических или экспериментальных работ по изучению

устройств ввода сырья и общепризнанных методик их расчета, что делает проблему изучения устройств ввода сырья актуальной.

Приведён обзор каплеотбойных устройств. Показано, что несмотря на большое разнообразие различных типов каплеотбойных устройств, достижение максимальных требований по капельному уносу жидкости с газом сепарации происходит с применением сложных устройств, таких, как фильтрующие элементы, имеющих в качестве недостатков сложность обслуживания, малый срок эффективной работы.

**Во второй главе** показаны расчетные и экспериментальные методы исследования.

Расчётные исследования по влиянию степени сепарации на технологические параметры процесса ректификации осуществлялись в программе математического моделирования технологических процессов Unisim Design.

Моделирование гидродинамики устройств ввода сырья и насадочных каплеотбойных устройств проводилось методами CFD-анализа, с применением программы ANSYS CFX. Программа позволяет решать уравнения гидродинамики, такие, как уравнение движения жидкости Эйлера, уравнение Навье-Стокса, уравнение неразрывности и сплошности потока, уравнение материального и энергетического баланса методом конечных объемов.

Экспериментальное исследование каплеотбойных насадочных устройств проводилось на стенде, схема которого представлена на рисунке 1.

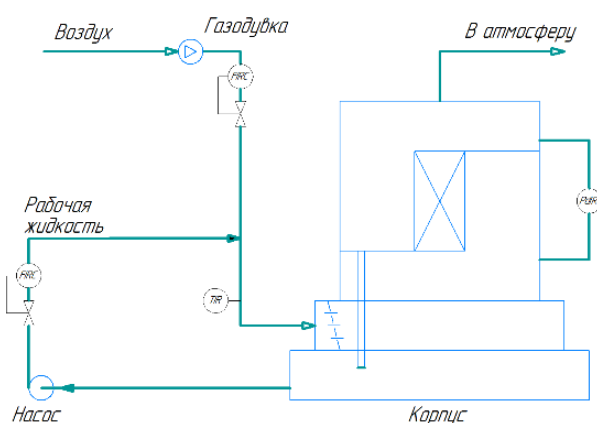


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки



Стенд имеет корпус круглого сечения, внутри которого размещен перекрёстноточный насадочный каплеотбойник типа «одна полоса». Исследования каплеотбойников проводились в среде воздух – вода. В результате испытаний фиксировалось наличие капельного уноса жидкости с газом и перепад давлений на слой насадки. Размеры насадки: высота слоя 0,60 м, длина полосы 0,50 м, ширина 0,10 м. Сечение прохода 0,30 м<sup>2</sup>. Сечение в окнах 0,087 м<sup>2</sup>. Удельная поверхность насадки 520 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Максимальный расход воздуха – 6700 м<sup>3</sup>/ч.

**В третьей главе** приведены результаты исследований работы устройств ввода сырья.

Согласно результатам математического моделирования, проведённого в среде Unisim Design, доля уноса жидкости в зоне ввода сырья ректификационной колонны оказывает влияние на энергозатраты процесса разделения. Смоделирован процесс разделения смеси предельных углеводородов C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>, процесс деэтанзации пирогаза, процесс выделения изопентановой фракции и изомеризата. Данные среды отличаются по молекулярной массе, структуре углеводородов. Результаты исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сводные результаты моделирования колонн

Описание колонны	Увеличение энергозатрат, %, при снижении степени разделения в зоне ввода сырья на:		
	1%	5%	10%
Модельная смесь C <sub>1</sub> -C <sub>4</sub> , 15 теор. тарелок	0,34	1,71	3,41
Деэтанализатор, 41 тар.	0,05	0,24	0,47
Деизопентанизатор, 60 тар.	0,10	0,50	1,02
Деизопентанизатор, 70 тар.	0,03	0,41	0,90
Деизопентанизатор, 80 тар.	0,03	0,14	0,28

Показано, что для процесса ректификации рассмотренных углеводородных смесей увеличение доли уноса жидкости в зоне питания на 5% приводит к увеличению энергозатрат на 0,14-1,71%. Отмечено, что чем меньше контактных устройств содержит колонна, тем большее влияние на энергозатраты процесса ректификации оказывает эффективность работы устройства ввода сырья.

На основе CFD-анализа определялись следующие величины:

- высота сепарационной зоны ( $h_1$ ), т.е. высота от оси штуцера ввода сырья до сечения, в котором наблюдается менее 1% об. жидкой фазы;

- высота зоны распределения ( $h_2$ ), т.е. высота от оси штуцера ввода сырья до сечения, в котором наблюдается равномерное распределение (разница менее 0,1 м/с между скоростями элементарных струек) паровой фазы. Пример приведен на рисунке 2: на сечениях «а» и «б» распределение неравномерное, на сечении «в» – равномерное;

- перепад давления (гидравлическое сопротивление,  $\Delta p$ ) устройства ввода сырья.

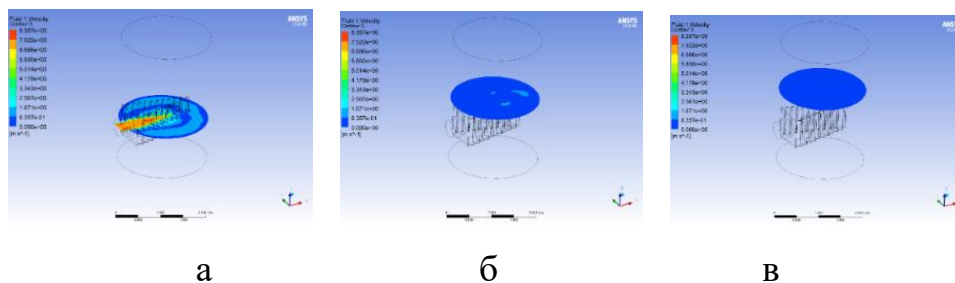


Рисунок 2 – Пример определения высоты зоны распределения ( $h_2$ )

В качестве показателей оценки эффективности работы устройств ввода сырья были приняты следующие величины:

- критерий высоты сепарационной зоны ( $k_1$ ), выраженный как отношение высоты сепарационной зоны колонны без устройств ввода сырья к высоте сепарационной зоны колонны с рассматриваемым устройством;

- критерий высоты зоны распределения ( $k_2$ ), выраженный как отношение высота зоны распределения колонны без устройств ввода сырья к высоте зоны распределения колонны с рассматриваемым устройством ввода сырья.

Проведен CFD-анализ отбойных и лопастного устройств ввода сырья, приведенных на рисунке 3.



Рисунок 3 – 3D-модели устройств ввода сырья для проведения расчетного исследования гидродинамики

Данные устройства состоят из расположенной напротив штуцера перегородки, отличающейся по конструктивному оформлению (плоской, вогнутой формы, с отверстием и без отверстия), целью которой является разделение потока сырья на 2 части и направление образующихся потоков вдоль стенки колонны для создания центробежной силы, обеспечивающей сепарацию паровой и жидкой фаз сырья. Результаты расчетов приведены на графиках (рисунок 4,5). На рисунке 4 представлены зависимости вышеприведенных критериев  $k_1$  и  $k_2$  от критерия Вебера, который характеризует соотношение сил инерции и поверхностного натяжения – показателя работы, требующейся на создание единицы межфазной поверхности, для возможности сравнения с работой устройств ввода сырья на других средах. На рисунке 5 представлена зависимость гидравлического сопротивления от скорости подачи потока.

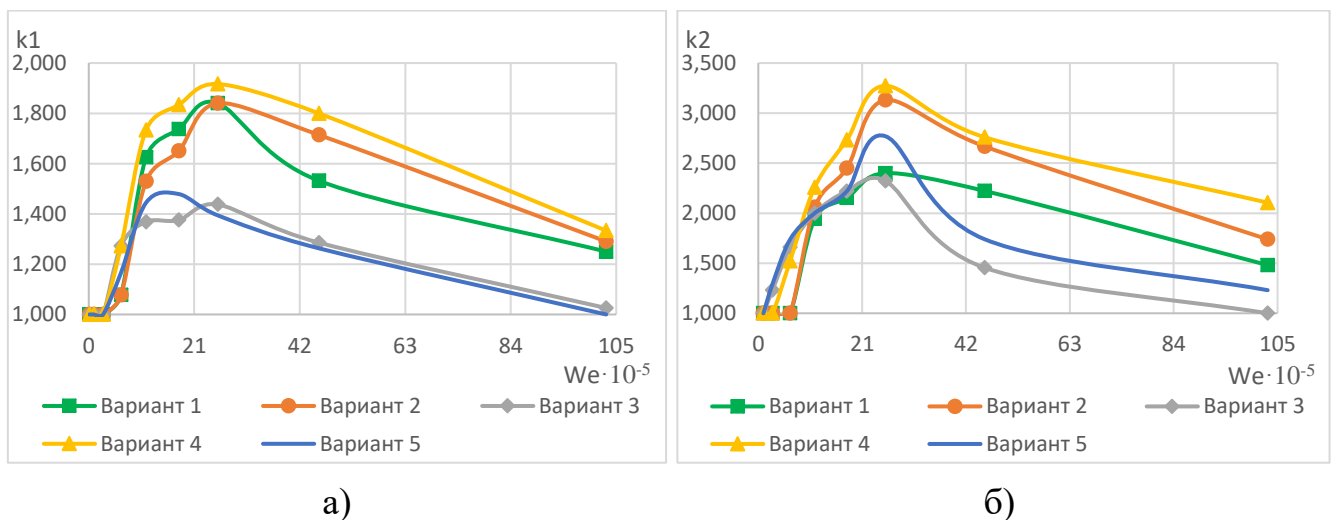


Рисунок 4 – Зависимость критериев высоты сепарационной зоны  $k_1$  (а) и высоты зоны распределения  $k_2$  (б) от критерия Вебера для потока сырья

При подаче сырья с высоким содержанием паровой фазы со скоростью не выше 5 м/с применение устройств ввода сырья нецелесообразно. При увеличении скорости подачи сырья происходит увеличение высоты сепарационной зоны. При скорости подачи сырья 15 м/с высота сепарационной зоны при отсутствии устройства ввода превышает 2000 мм. Для отбойных устройств по вариантам 1, 2, 4 критерий высоты сепарационной зоны составляет 1,07 – 1,92 при скорости подачи сырья 7,5-15 м/с, при скорости свыше 20 м/с критерий снижается. Устройства по вариантам 3, 5 (с отверстием напротив штуцера ввода сырья) требуют большей высоты сепарационной зоны, критерий не превышает 1,48. Это связано с применением отверстия напротив штуцера ввода сырья, что уменьшает расход потоков, направляемых вдоль стенки колонны, а поток, проходящий прямо через отверстие, ударяется об стенку колонны напротив, и возникает эффект разбрызгивания.

Зависимость гидравлического сопротивления от скорости подачи сырья (рисунок 5) для всех устройств ввода сырья имеет классический, параболический характер. Наибольшим гидравлическим сопротивлением обладает устройство по варианту 1, так как поток ударяется перпендикулярно о стенку отбойника. Устройства ввода по вариантам 2, 4 имеют меньшее гидравлическое сопротивление, так как происходит направление потоков вдоль корпуса колонны. Самый низкий перепад давления наблюдается в устройствах ввода по вариантам 3, 5, где часть потока не ударяется о стенку отбойника, а через отверстие попадает напрямую в колонну.

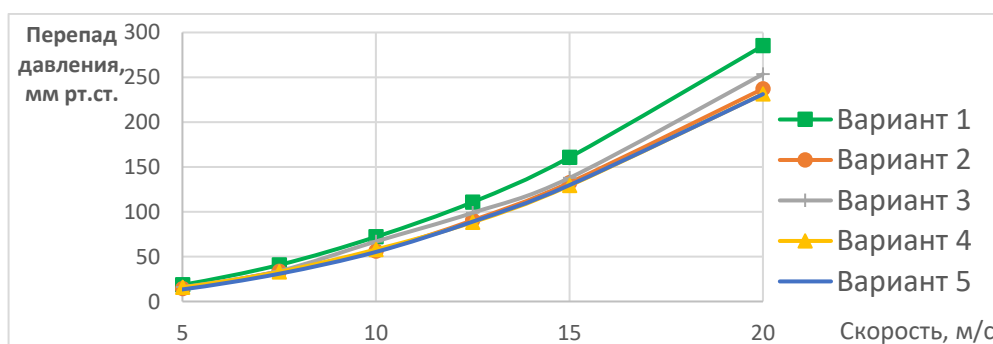


Рисунок 5 – Зависимость гидравлического сопротивления от скорости подачи сырья для различных устройств ввода сырья

Для рассмотренных устройств ввода сырья с отбойниками на основе уравнения Вейсбаха были рассчитаны коэффициенты гидравлических сопротивлений, приведенных в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты гидравлического сопротивления отбойных устройств ввода сырья

Вариант	Коэффициент сопротивления $\xi$
1	2,252
2	1,838
3	1,968
4	1,813
5	1,798

По результатам CFD-анализа исследуемого одноканального лопастного устройства ввода сырья были получены зависимости, показанные на рисунке 6. Моделируемое лопастное устройство ввода сырья обеспечивает отделение жидкой фазы от паровой с высотой сепарационной зоны, не превышающей высоту самого устройства ввода сырья, при скорости подачи сырья 10 м/с, и меньше, чему соответствует значение критерия Вебера  $1,14 \cdot 10^6$ , и меньше. В связи с этим наблюдается резкий рост критерия высоты сепарационной зоны.

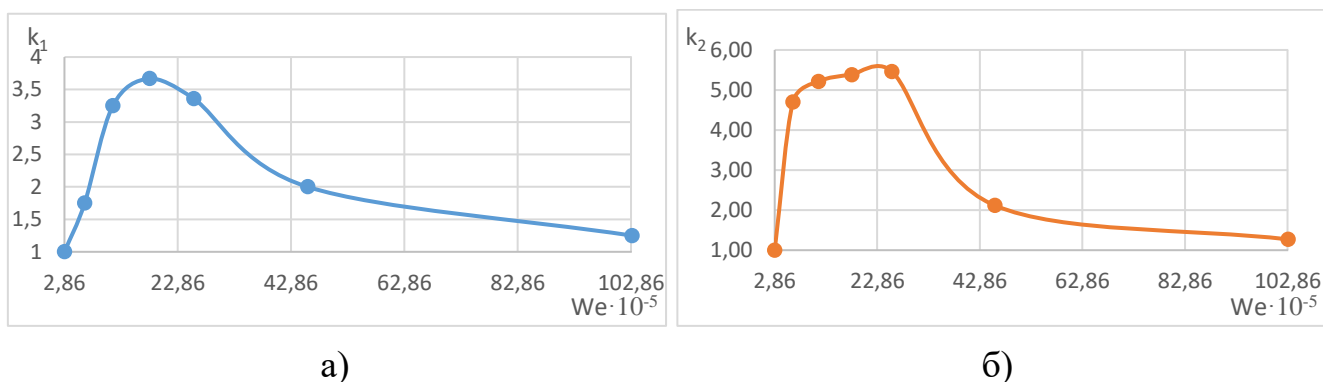


Рисунок 6 – Зависимость критериев высоты зон сепарации (а) и распределения паровой фазы (б) от критерия Вебера сырьевого потока для одноканального лопастного устройства ввода сырья

Одноканальное лопастное устройство ввода сырья в пределах скоростей от 7,5 до 15 м/с (значение критерия Вебера  $6,43 \cdot 10^5$  –  $2,57 \cdot 10^6$ ) уменьшает высоту зоны

распределения в 4,5-5,5 раза по сравнению с вариантом без использования устройств ввода сырья. При малой скорости подачи сырья распределение газа по сечению колонны неравномерно ввиду низкой турбулентности потока, при высокой скорости подачи сырья элементарные струи потока имеют слишком высокую скорость, что препятствует равномерному перемешиванию. Перепад давления в устройстве ввода возрастает при увеличении скорости подачи сырья. Коэффициент сопротивлений  $\xi$  равен 1,320, что меньше, чем для отбойных устройств по вариантам 2-5, в 1,36 – 1,71 раз.

На следующем этапе расчетного исследования лопастного устройства ввода сырья рассматривалось влияние на критерии разделения и распределения потока следующих параметров: ширина лопасти, расстояние между лопастями, угол поворота лопасти относительно перпендикуляра к плоскости выхода потока из устройства (рисунок 7), доли отгона сырья.

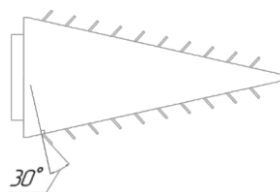


Рисунок 7 – К определению угла поворота лопасти (на рисунке  $30^\circ$ )

В исследованном диапазоне показано, что увеличение ширины лопастей ведет к увеличению критерия высоты сепарационной зоны, особенно при высоких скоростях сырьевого потока, а также к уменьшению высоты зоны распределения парового потока, при скоростях подачи сырья 7,5 – 20 м/с (критерий Вебера  $6,43 \cdot 10^5$  –  $4,58 \cdot 10^6$ ), и практически не влияет на гидравлическое сопротивление, которое зависит только от скорости подачи потока сырья.

По результатам CFD-анализа обнаружено, что наибольшее значение критерия высоты сепарационной зоны наблюдается при расстоянии между лопастями 126 мм (количество лопастей 10 шт.). Расстояние между лопастями практически не влияет на гидравлическое сопротивление, которое зависит только от скорости подачи потока сырья.

Увеличение угла поворота лопастей приводит к уменьшению значения критерия высоты сепарационной зоны от 5,86 при угле поворота лопасти  $10^\circ$  до 1,88 при угле поворота лопасти  $60^\circ$ , при скорости потока 15 м/с (критерий Вебера  $2,57 \cdot 10^6$ ). Гидравлическое сопротивление наибольшее для устройств ввода с углом поворота лопасти  $10^\circ$  и  $60^\circ$ . Минимальное гидравлическое сопротивление наблюдается при угле поворота лопасти  $20^\circ$ , при дальнейшем увеличении этого показателя до  $60^\circ$  гидравлическое сопротивление при скорости 15 м/с увеличивается от 155,5 до 178,1 мм рт. ст., т.е. на 14,53%.

Результаты исследования одноканального лопастного устройства ввода сырья показали, что наблюдается следующая зависимость: чем выше доля отгона, тем ниже высота сепарационной зоны. Визуализация распределения потока жидкости при скорости 15 м/с показана на рисунке 8.

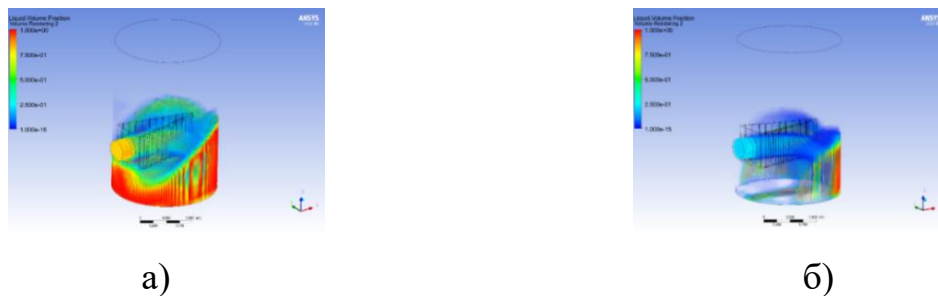


Рисунок 8 – Визуализация распределения потока жидкости при доле отгона 0,2 (а) и 0,8 (б) при скорости 15 м/с

Как видно из рисунка 8, при малой доле отгона 0,2 и скорости подачи сырья 15 м/с, большое количество жидкости, частично направляясь вдоль лопастей и частично попадая в зону напротив штуцера ввода сырья, заполняют собой большую часть сечения колонны, сталкиваются со стенкой корпуса колонны, вследствие чего возникает эффект разбрызгивания капель жидкости. При доле отгона 0,8 м/с количество жидкой фазы в потоке значительно меньше, в связи с чем жидкость заполняет малую часть поверхности стенки колонны, эффект разбрызгивания проявляется значительно меньше, только в области напротив штуцера ввода сырья.

В результате обработки результатов CFD-анализа получены эмпирические уравнения влияния конструктивных параметров исследованного одноканального

лопастного устройства ввода сырья на критерии его работы. Зависимость критерия высоты сепарационной зоны  $k_1$  лопастного устройства ввода сырья от критерия Вебера и ширины лопасти имеет вид:

$$k_{1\text{расч.}} = -0,00004We^2 - 0,022We + 10,615b + 1,985 \quad (1)$$

где:  $We$  – значение критерия Вебера, умноженное на  $10^{-5}$ ;

$b$  – ширина лопасти, м.

Уравнение зависимости критерия высоты сепарационной зоны  $k_1$  лопастного устройства ввода сырья от критерия Вебера и расстояния между лопастями:

$$k_{1\text{расч.}} = 0,00032We^2 - 0,059We - 15,96004r^2 + 3,024r + 3,831 \quad (2)$$

где:  $We$  – значение критерия Вебера, умноженное на  $10^{-5}$ ;

$r$  – расстояние между лопастями, м.

Для расширения диапазона эффективной работы одноканального устройства было предложено два двухканальных устройства V-образного типа из которых наиболее высокую эффективность показало лопастное устройство ввода сырья с тангенциальными элементами, приведенное на рисунке 9.

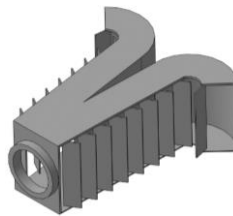


Рисунок 9 – 3D-модель двухканального V-образного лопастного устройства ввода сырья с тангенциальными элементами

Двухканальное лопастное V-образное устройство ввода сырья, показанное на рисунке 9, за счет дополнительных тангенциальных элементов создаёт центробежную силу, которая обеспечивает более эффективную сепарацию парожидкостного потока сырья при высоких скоростях подачи сырья 20-30 м/с (критерий Вебера  $4,58 \cdot 10^6 - 1,03 \cdot 10^7$ ). В этом диапазоне скоростей подачи сырья для данного устройства критерий высоты сепарационной зоны выше в 1,02 – 1,25 раз, чем для исследованного одноканального лопастного устройства ввода сырья, а



коэффициент сопротивления  $\xi$  меньше на 6,7%, чем для одноканального лопастного устройства ввода сырья.

Для V-образного двухканального лопастного устройство ввода сырья с тангенциальными элементами наблюдаются следующие зависимости от конструктивных параметров: увеличение значения критерия высоты сепарационной зоны наблюдается при увеличении ширины лопасти, уменьшении расстояния между лопастями и угла поворота лопасти. На гидравлическое сопротивление перечисленные конструктивные параметры не оказывают существенного влияния. Увеличение доли отгона сырья снижает высоту сепарационной зоны и снижает его гидравлическое сопротивление.

Зависимость критерия высоты сепарационной зоны  $k_1$  V-образного двухканального лопастного устройство ввода сырья с тангенциальными элементами от критерия Вебера и ширины лопасти имеет вид:

$$k_{1\text{расч.}} = -0,00032We^2 + 0,0292We + 21,05718b^2 + 1,999b + 1,288 \quad (3)$$

где:  $We$  – значение критерия Вебера, умноженное на  $10^{-5}$ ;

$b$  – ширина лопасти, м.

Уравнение зависимости критерия высоты сепарационной зоны  $k_1$  для данного устройства ввода сырья от критерия Вебера и расстояния между лопастями имеет следующий вид:

$$k_{1\text{расч.}} = -0,0005We^2 + 0,0511We + 77,1213r^2 - 29,7945r + 4,125 \quad (4)$$

где:  $We$  – значение критерия Вебера, умноженное на  $10^{-5}$ ;

$r$  – расстояние между лопастями, м.

Сравнение устройств ввода сырья отбойного типа (вариант 4, имеющий наибольшее значение критерия сепарационной зоны), устройства ввода сырья одноканального лопастного типа, V-образного двухканального лопастного устройства ввода сырья с тангенциальными элементами приведено на рисунке 10.

Результаты сравнительного анализа показывают, что при скорости подачи сырья 7,5-15 м/с (значениях критерия Вебера от  $6,43 \cdot 10^5$  до  $4,58 \cdot 10^6$ ) для достижения минимальных значений высот сепарационной зоны и зоны распределения эффективнее применять одноканальное лопастное устройство ввода

сырья, а при более высоких скоростях 20-30 м/с (значениях критерия Вебера от  $4,58 \cdot 10^6$  до  $1,03 \cdot 10^7$ ) для достижения минимальных значений высоты сепарационной зоны и гидравлического сопротивления рекомендуется применять двухканальное лопастное устройство с тангенциальными элементами.

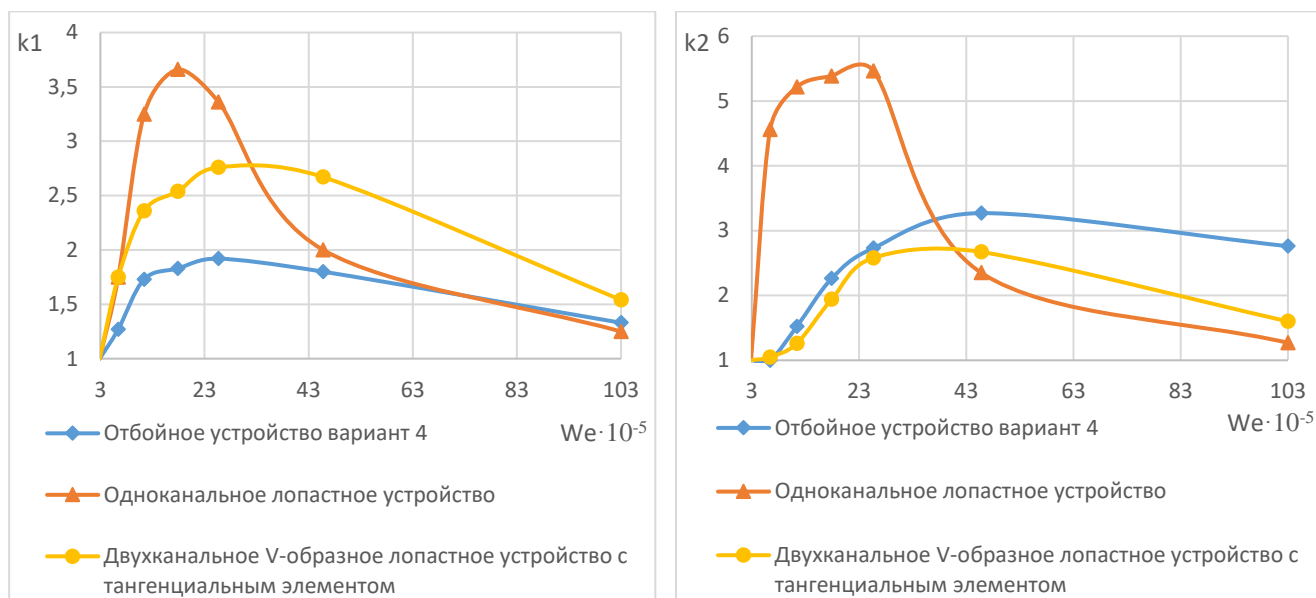
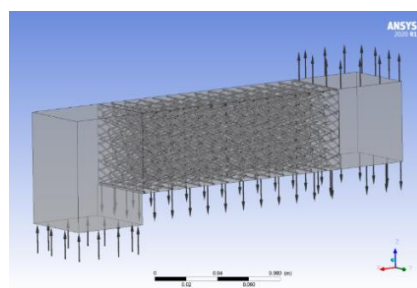
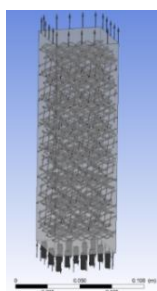


Рисунок 10 – Зависимость критерия высоты сепарационной зоны ( $k_1$ ) и критерия зоны распределения ( $k_2$ ) от критерия Вебера для разных устройств ввода сырья

В четвертой главе приведены результаты исследования насадочных каплеотбойников противоточной (горизонтальной) и перекрестноточной (вертикальной) конфигурации (тип «одна полоса»). Общий вид каплеотбойных устройств приведен на рисунке 11.



Противоточный каплеотбойник

Перекрестноточный каплеотбойник

Рисунок 11 – Расчетные 3D-модели противоточного и перекрестноточного насадочных каплеотбойников типа «одна полоса»

На первом этапе исследований были проведены стендовые испытания перекрестноточного однополосного насадочного каплеотбойника с целью изучения зависимости наличия капельного уноса на выходе из каплеотбойника от F-фактора. Среда – воздух, с содержанием небольшого количества воды в капельном виде. Результаты исследования приведены в таблице 3. Ширина слоя насадки 100 мм.

Таблица 3 – Экспериментальные и расчетные данные исследования перекрестноточного однополосного каплеотбойника на среде воздух – вода

Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	F-фактор на сечение слоя, Па <sup>0,5</sup>	F-фактор в окнах, Па <sup>0,5</sup>	Наличие уноса	Перепад давления, Па	Перепад давления на метр ширины насадки, Па/м
2600	2,59	8,94	отсутствие	121,52	1215,2
3000	2,98	10,28	отсутствие	179,85	1798,5
3400	3,37	11,63	отсутствие	243,04	2430,4
3800	3,77	13,00	отсутствие	291,65	2916,5
4200	4,17	14,37	отсутствие	349,98	3499,8
4600	4,56	15,74	наличие	403,45	4034,5
4800	4,78	16,48	наличие	437,47	4374,7
5000	4,96	17,10	наличие	476,36	4763,6
5400	5,36	18,47	наличие	549,27	5492,7
5800	5,76	19,87	наличие	631,91	6319,1
6200	6,15	21,21	наличие	704,82	7048,2
6700	6,67	22,99	наличие	777,73	7777,3

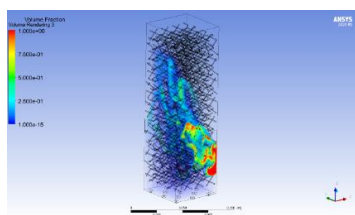
Как видно из таблицы 3, перекрестноточное однополосное насадочное каплеотбойное устройство обеспечивает отсутствие каплеуноса при нагрузках по газу до 4,17 Па<sup>0,5</sup>.

На следующей стадии исследования был проведен CFD-анализ насадочных каплеотбойных устройств с целью сравнения противоточного и перекрестноточного типов каплеотбойных устройств, определения их диапазона работы по скорости потока газа и F-фактору, в котором достигается отсутствие капельного уноса. На первом этапе было выполнено моделирование перекрестноточного каплеотбойника при параметрах стендовых испытаний для проверки адекватности расчета методами CFD-анализа. Результаты расчетов приведены в таблице 4. Расчетная ширина слоя насадки принята 150 мм.

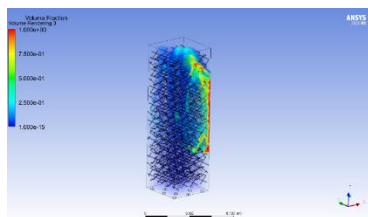
Таблица 4 – Результаты CFD-анализа перекрестноточного однополосного каплеотбойника на системе воздух-вода

Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	F-фактор на сечение слоя, Па <sup>0,5</sup>	Наличие уноса	Перепад давления, Па	Перепад давления на метр ширины насадки, Па/м	Ошибка относительно эксперимента, %
300,00	2,59	отсутствие	194,26	1295,07	6,6
260,00	2,98	отсутствие	284,63	1897,53	5,5
230,00	3,37	отсутствие	385,33	2568,86	5,7
200,00	3,77	отсутствие	460,28	3068,54	5,2
190,00	4,17	отсутствие	549,03	3660,18	4,6
170,00	4,56	наличие	583,30	3888,64	3,6
160,00	4,78	наличие	647,98	4319,87	1,3
150,00	4,96	наличие	714,54	4763,59	0,0
140,00	5,36	наличие	839,42	5596,13	1,9
130,00	5,76	наличие	967,54	6450,28	2,0
120,00	6,15	наличие	1020,77	6805,12	3,4
110,00	6,67	наличие	1132,32	7548,82	2,9

На следующем этапе произведено моделирование гидродинамики противоточного и перекрестноточного однополосного насадочных каплеотбойников в среде легких углеводородов C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>. Результаты расчетов подтвердили ранее полученные нами выводы о диапазоне эффективной работы. На рисунке 12 приведена визуализация распределения потока жидкой фазы в насадочных каплеотбойниках при различном F-факторе.

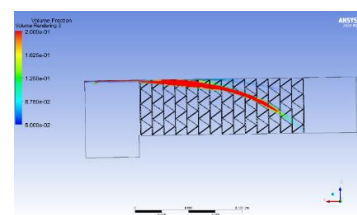


$$F = 2,1 \text{ Па}^{0,5}$$

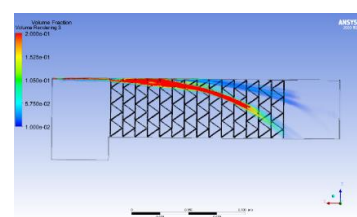


$$F = 2,2 \text{ Па}^{0,5}$$

Противоточный каплеотбойник



$$F = 4,2 \text{ Па}^{0,5}$$



$$F = 4,3 \text{ Па}^{0,5}$$

Перекрестноточный каплеотбойник

Рисунок 12 – Распределение потока жидкой фазы в насадочном каплеотбойнике

Таким образом, видно, что перекрестноточный однополосный насадочный каплеотбойник имеет более широкий диапазон эффективной работы по сравнению с противоточным. Для противоточного каплеотбойника диапазон удельной нагрузки по газу равен от 0 до  $2,1 \text{ Па}^{0,5}$ , для перекрестноточного каплеотбойника: от 0 до  $4,2 \text{ Па}^{0,5}$ , при этом моделирование проводилось только для одноступенчатого варианта. Низкий диапазон работы противоточного каплеотбойника объясняется явлениями вторичного каплеуноса, при котором капли жидкости подхватываются восходящим потоком газа и направляются вверх. Конструкция перекрестноточного каплеотбойника исключает это явление, так как жидкость перетекает вниз, не контактируя со встречным потоком газа. В этой же связи гидравлическое сопротивление перекрестноточного каплеотбойника ниже, чем противоточного в 1,1 – 1,7 раз.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложены критерии оценки работы устройства ввода сырья: критерий высоты сепарационной зоны ( $k_1$ ) и критерий зоны распределения ( $k_2$ ).

2. По предложенным критериям с применением методов CFD-анализа определены гидродинамические характеристики устройств ввода сырья отбойного и лопастного типов, с целью оценки диапазонов их эффективного применения. Разработаны V-образные двухканальные лопастные устройства ввода сырья, на которые получены патенты на изобретение № 2773283 и на полезную модель №211921.

Показано, что для достижения минимальной высоты сепарационной зоны рекомендуется применение:

- одноканального лопастного устройства ввода при скорости подачи сырья от 7,5 до 15 м/с (значениях критерия Вебера от  $6,43 \cdot 10^5$  до  $2,57 \cdot 10^6$ );

- V-образного лопастного двухканального устройства ввода сырья с тангенциальными элементами при скорости подачи сырья от 20 до 30 м/с (значениях критерия Вебера от  $4,58 \cdot 10^6$  до  $2,86 \cdot 10^7$ ).

Минимальное значение коэффициента гидравлического сопротивления имеет V-образное двухканальное лопастное устройство с тангенциальными элементами. Одноканальные лопастные устройства ввода сырья имеют примерно похожие значения коэффициентов, а наиболее простые эффективные отбойные устройства имеют коэффициент сопротивления в 1,32-1,47 раз выше чем лопастные.

3. Для лопастных конструкций получены эмпирические уравнения зависимости критерия высоты сепарационной зоны от: значения критерия Вебера и ширины лопасти, значения критерия Вебера и расстояния между лопастями. Данные уравнения можно использовать в пределах исследуемых диапазонов критерия Вебера  $2,86 \cdot 10^5 - 1,03 \cdot 10^7$ , ширины лопастей 50 – 175 мм, расстояния между лопастями 90 – 243 мм.

4. Оценено влияние доли отгона сырья и конструктивных параметров на эффективность сепарации и гидравлическое сопротивление. Методом CFD-анализа показано, что:

- при увеличении доли отгона уменьшается высота сепарационной зоны и гидравлическое сопротивление рассмотренных отбойных и лопастных устройств;
- увеличение ширины лопастей, уменьшение угла поворота лопасти в исследуемом диапазоне повышает эффективность работы лопастных устройств;
- ширина лопастей и расстояние между лопастями незначительно влияют на гидравлическое сопротивление.

5. Определены области эффективной работы насадочных каплеотбойных устройств противоточной и перекрестноточной конфигурации с применением методов CFD-анализа. Для противоточного каплеотбойника диапазон удельной нагрузки по газу составляет от 0 до 2,1 Па<sup>0,5</sup>, для перекрестноточного каплеотбойника она составляет от 0 до 4,2 Па<sup>0,5</sup>. Гидравлическое сопротивление перекрестноточного каплеотбойника меньше в 1,1 – 1,7 раз, чем противоточного. Разработана и апробирована методика по определению капельного уноса жидкости с газом сепарации, программа для ЭВМ «Расчет насадочного каплеотбойника для вертикальных газовых сепараторов с известным диаметром».

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих научных трудах:**

**в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:**

1. Маннанов, Т.И. Исследование эффективности различных конструкций устройств ввода сырья в массообменные колонны методом CFD-анализа / Т.И. Маннанов, С.К. Чуракова // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2021. – №11. – с. 3-6.
2. Маннанов, Т.И. Расчетное исследование работы лопастных устройств ввода массообменного и сепарационного оборудования / Т.И. Маннанов, С.К. Чуракова // Башкирский химический журнал, 2021. – Т.28. №4. – с. 97-102.
3. Маннанов, Т.И. Исследование насадочных каплеотбойных устройств методом CFD-анализа / Т.И. Маннанов, С.К. Чуракова // Химия и технология топлив и масел, 2022. – №3. – с. 53-56.

**в патентах:**

4. Пат. на изобретение № RU 2773283 Устройство подачи сырья в массообменный аппарат (варианты) / Т.И. Маннанов, С.К. Чуракова, И.И. Маннанова. Оpubл. 01.06.2022. Бюл. №16.
5. Пат. на полезную модель № 211921 Устройство ввода парожидкостного сырья в массообменный аппарат / Т.И. Маннанов, С.К. Чуракова. Оpubл. 28.06.2022. Бюл. №19.

**в программе для ЭВМ:**

6. Расчет насадочного каплеотбойника для вертикальных газовых сепараторов с известным диаметром / Маннанов Т.И., Чуракова С.К., Св-во о регистрации программы для ЭВМ № 2021613501, 09.03.2021.

**в учебном пособии:**

7. Чуракова С.К. Расчет процесса и аппаратурного оформления ректификации бинарной и многокомпонентной смеси: учебное пособие / С.К. Чуракова, Т.И. Маннанов, Е.В. Комарова, М.А. Клишкин, С.П. Ломакин; УГНТУ. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2022. – 93 с.

**в материалах научных конференций:**

8. Маннанов, Т.И. Исследование влияния эффективности сепарации в узле ввода сырья ректификационных колонн на энергетические затраты / Т.И. Маннанов, Д.В. Лесной, С.К. Чуракова // Булатовские чтения, 2019. – Т.4. – с. 85-88.
9. Лесной, Д.В. Исследовательский полномасштабный стенд для определения граничных областей гидродинамической устойчивости контактных устройств фракционирующего оборудования / Д.В. Лесной, Т.И. Маннанов, Е.К. Константинов, К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова // Новые направления работ на нефть и газ, инновационные технологии разработки их месторождений, перспективы добычи нетрадиционного углеводородного сырья: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Оренбург, 2019. – с. 172-175.
10. Маннанов Т.И., Чуракова С.К., Лесной Д.В., Константинов Е.К., Муллабаев К.А. CFD-анализ – современный подход к исследованию процесса разделения и

распределения потоков в устройствах ввода сырья массообменных аппаратов // Булатовские чтения, 2020. – Т.5. – с. 159-165.

11. Мингалимов, З.Ф. Оценка эффективности каплеотбойных устройств различного типа / З.Ф. Мингалимов, Т.И. Маннанов, С.К. Чуракова // Актуальные проблемы науки и техники: сб. матер. XIV Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. – Уфа, из-во УГНТУ, 2021. – с. 264-266.

12. Маннанов, Т.И. Влияние наличия нижнего днища лопастного устройства ввода сырья на показатели его работы / Т.И. Маннанов, С.К. Чуракова // Теория и практика массообменных процессов химической технологии: материалы VI Межд. науч. конф. – Уфа, 2021. – с. 45-47.

13. Маннанов, Т.И. Влияние доли отгона парожидкостного потока на показатели работы лопастного устройства ввода сырья / Т.И. Маннанов, С.К. Чуракова // Теория и практика массообменных процессов химической технологии: материалы VI Межд. науч. конф. – Уфа, 2021. – с. 47-49.

14. Мингалимов, З.Ф. Каплеотбойные устройства «РЕТОН» / З.Ф. Мингалимов, С.К. Чуракова, Д.В. Лесной, Т.И. Маннанов // Теория и практика массообменных процессов химической технологии: материалы VI Межд. науч. конф. – Уфа, 2021. – с. 398-399.

15. Маннанов, Т.И. Расчетное исследование влияния полноты сепарации парожидкостного сырья на энергозатраты процесса ректификации различных смесей / Т.И. Маннанов, В.А. Чураков, С.К. Чуракова // Булатовские чтения, 2022. – Т.2. – с. 100-102.

16. Маннанов, Т.И. Моделирование гидродинамики лопастных устройств ввода сырья в ректификационную колонну деэтанализации пирогаза / Т.И. Маннанов, С.К. Чуракова // Актуальные проблемы и направления развития технологий органического и неорганического синтеза в условиях импортозамещения: сб. матер. II Межд. науч.-практ. конф. – Уфа: из-во Нефтегазовое дело, 2022. – с. 556-558.

17. Маннанов, Т.И. CFD-анализ лопастных устройств ввода сырья в колонну разделения фенольной фракции / Т.И. Маннанов, С.К. Чуракова // Актуальные проблемы и направления развития технологий органического и неорганического синтеза в условиях импортозамещения: сб. матер. II Межд. науч.-практ. конф. – Уфа: из-во Нефтегазовое дело, 2022. – с. 559-561.

18. Маннанов, Т.И. Расчет коэффициентов гидравлического сопротивления для различных устройств ввода сырья / Т.И. Маннанов, В.А. Чураков, С.К. Чуракова // Материалы межд. науч.-практ. конф., посвященной 90-летию начала добычи первой башкирской нефти. – Уфа, 2022. – с. 102-104.