

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»



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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Чуракова Светлана Константиновна

Уфа – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. Литературный обзор устройств ввода сырья, каплеотбойного оборудования и методов их CFD-анализа.....	8
1.1 Устройства ввода сырья в массообменное и сепарационное оборудование.....	9
1.1.1 Классические конструкции узлов ввода сырья.....	9
1.1.2 Современные виды узлов ввода сырья.....	10
1.2 Моделирование гидродинамики устройств ввода сырья методом CFD-анализа.....	15
1.3 Каплеотбойные устройства.....	27
Выводы по главе 1.....	39
Глава 2. Объекты и методы исследования.....	40
2.1 Объекты исследования.....	40
2.2 Методы исследования.....	42
2.2.1 Математическое моделирование исследуемых процессов с применением программного обеспечения.....	42
2.2.2 Физическое моделирование каплеотбойных устройств на стенде.....	48
Выводы по главе 2.....	49
Глава 3. Исследование работы устройств ввода сырья.....	50
3.1 Расчетное исследование влияния работы устройств ввода сырья на энергозатраты процесса ректификации.....	51
3.2 CFD-анализ устройств ввода сырья различной конструкции.....	58
3.2.1 Отбойные устройства ввода сырья.....	58
3.2.2 Одноканальное лопастное устройство ввода сырья.....	79
3.2.3 Двухканальное V-образное лопастное устройство ввода сырья.....	101
3.2.4 Двухканальное V-образное лопастное устройство ввода сырья с тангенциальными элементами.....	112
3.3 Сравнительный анализ устройств ввода сырья.....	123
Выводы по главе 3.....	128
Глава 4. Исследование работы насадочных каплеотбойных устройств.....	130
4.1 Экспериментальное исследование перекрестноточного насадочного каплеотбойника.....	131
4.2 CFD-анализ противоточного и перекрестноточного насадочного каплеотбойника.....	135
Выводы по главе 4.....	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	143
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	164

ВВЕДЕНИЕ

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^{0,5}, для перекрестноточного каплеотбойника диапазон от 0 до 4,2 Па^{0,5}, 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.

Глава 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР УСТРОЙСТВ ВВОДА СЫРЬЯ, КАПЛЕОТБОЙНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДОВ ИХ CFD-АНАЛИЗА

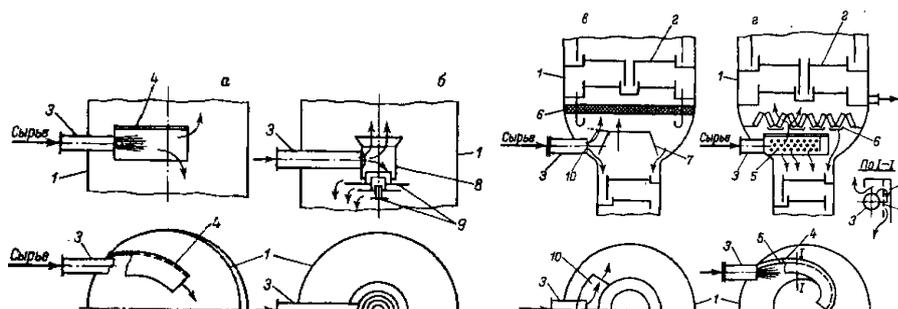
Устройства ввода сырья применяются в ректификационных колоннах, а также в сепараторах, для подачи потока парового, жидкостного или парожидкостного сырья, с целью обеспечения сепарации парожидкостного потока и равномерного распределения паровой фазы в укрепляющую секцию колонны и жидкой фазы в отгонную секцию колонны. В настоящее время широкое распространение получили устройства ввода сырья отбойного типа, лопастные и тангенциальные устройства ввода сырья. Данные устройства составляют неотъемлемую часть комплекта внутренних устройств массообменного оборудования наряду с контактными устройствами – насадками или тарелками. Зачастую при расчете процесса ректификации принимается, что в зоне ввода сырья происходит процесс однократного испарения и конденсации парожидкостного сырья, таким образом, зона ввода сырья считается в колонне как теоретическая тарелка. В связи с этим является важной полнота сепарации сырьевого потока в этих устройствах, что исследуется путем CFD-анализа гидродинамики устройств ввода сырья, проводимые научными коллективами различных стран. Помимо полноты сепарации также является важным распределение потоков по сечению колонны, так как это влияет на эффективность контактных устройств, особенно для противоточных насадочных устройств.

Каплеотбойные устройства применяются в сепарационных аппаратах и в ректификационных колоннах для предотвращения капельного уноса жидкости с выходящей из аппарата паровой фазой. В настоящее время получили широкое распространение сетчатые и насадочные каплеотбойники, устройства с фильтрующими и циклонными элементами. Наличие жидкости в паровой фазе может привести, например, к поломке компрессорного оборудования для процессов сжатия газов, образованию пробок в газопроводах из-за выпадения конденсата либо потере ценных жидких продуктов, например, растворов амина в абсорбционных колоннах.

1.1 Устройства ввода сырья в массообменное и сепарационное оборудование

1.1.1 Классические конструкции узлов ввода сырья

Узел ввода сырья предназначен для подачи сырьевого парового или парожидкостного потока сырья в массообменный колонный аппарат, в нем происходит сепарация на потоки паровой и жидкой фазы и направление этих потоков соответственно в укрепляющую и отгонную секцию колонны [1,2]. Пространство колонны, в котором происходит ввод сырья, называется эвапорационным пространством. На Рисунке 1.1 приведены классические конструкции устройств ввода сырья.



1 – корпус; 2 – ВКУ; 3 – штуцер ввода сырья; 4 – направляющая улита;
5 – перфорированные пластины; 6 – каплеотбойник; 7 – конус, 8 – разделительное устройство; 9 – отражатель; 10 – козырек

Рисунок 1.1 – Устройства ввода сырья в колонну [1,2]

По варианту «а» (Рисунок 1.1) штуцер ввода сырья находится в стороне от оси колонны. Сырье направляется во входное устройство, которое состоит из вертикальной направляющей и горизонтального козырька, что обеспечивает ввод потока без брызгообразования и разделения сырья на пар и жидкость. Данный узел ввода сырья нашел широкое применение в стабилизирующих и атмосферных колоннах установок первичной перегонки нефти.

Вариант «б» устройства ввода сырья предназначен для колонн с жидкостным питанием (либо с небольшой долей отгона), например, для колонн стабилизации и

вторичной перегонки бензина. Сырье через штуцер вводится в расположенный по оси колонны разделительное устройство, из которого вверх уходят пары сырья, а вниз – жидкая его часть. Для равномерного распределения жидкости в отгонную часть колонны применяются распределители.

Устройство ввода сырья необходимо для вакуумных колонн установок первичной перегонки нефти в связи с высокой скоростью и низкой плотностью парового потока сырья, кроме этого, дополнительную сложность представляет разность диаметров укрепляющей и отгонной части колонн, которые могут различаться в 2 и более раза. Кроме этого, в связи с применением насадочных устройств в вакуумных колоннах является необходимым максимально равномерное распределение потока по ее сечению.

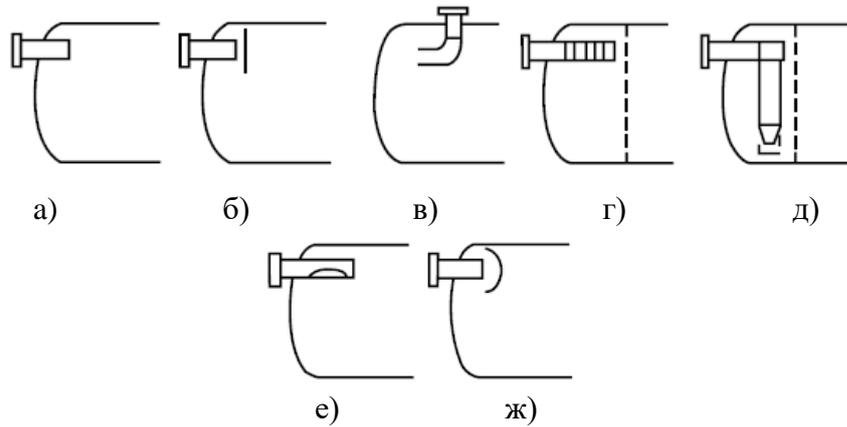
Согласно варианту «в» парожидкостное сырье поступает в колонну через патрубок, ударяется об сепарирующий конус 7. Для предотвращения каплеуноса применяется отбойный козырек 10. По варианту «г» сырье вводится тангенциально с помощью направляющей улиты 4. Это позволяет достигать высокой четкости сепарации сырьевого потока [1,2].

В ряде случаев, например, колонны установок каталитического крекинга, сырье подается в виде перегретого пара. В данном случае сырье подается через радиальный патрубок. Дополнительные распределители не применяются.

1.1.2 Современные виды узлов ввода сырья

Основной функцией устройства ввода исходной смеси в секции входа является уменьшения кинетической энергии потока, сепарация парожидкостного потока и равномерное распределение потоков [2,3].

В зависимости от технологических условий процесса, свойств подаваемой смеси жидкости и газа, применяются различные виды входных устройств. Схематично конструкции входных устройств представлены на Рисунке 1.2, на примере устройств, применяемых в сепараторах [4].



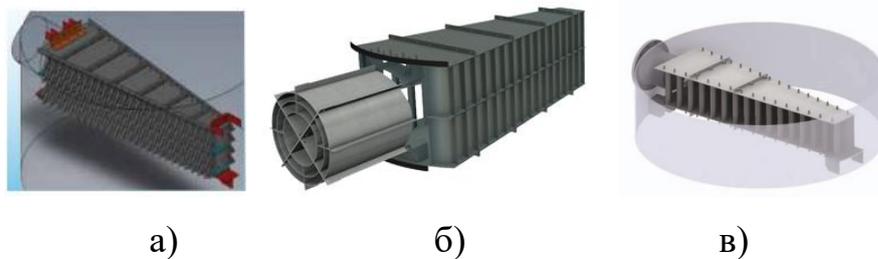
а) – без устройства ввода; б) – отбойное устройство; в) – обратная труба;
 г) – лопастное устройство; д) – циклон; е) – «хаф-пайп»; ж) – дефлектор

Рисунок 1.2 – Типы вводных устройств в сепаратор

В качестве входной перегородки могут применяться плоская пластина, стальной швеллер, сферическая тарелка или конус. Данные устройства имеют ряд недостатков, такие как невысокая эффективность сепарации и брызгоунос.

Устройство ввода сырья «хаф-пайп» применяется в широком диапазоне нагрузок по паровой фазе. Оно имеет трубчатую конструкцию с диаметром входного штуцера и открытую область в верхней или нижней части. Устройство «хаф-пайп» не только снижает скорость жидкости на входе, но и направляет ее вниз, при этом газ направляется в верхнюю секцию аппарата.

Устройство ввода сырья лопастного типа применяется в колонном оборудовании, а также в сепараторах. Сырье подается в сосуд через устройство, в котором уменьшается скорость потока, жидкость направляется вниз, а газ равномерно распределяется по сечению аппарата [4]. Например, фирма «Sulzer» производит устройства ввода лопастного типа, позволяющие подавать сырье с долей пара более 70 об. % [5]. Похожие устройства производятся компаниями Shell Oil Company [6], FMC Technologies [7], OMEGA separations [8]. В отечественной промышленности такие устройства устанавливают не только в колоннах, но и в горизонтальных сепараторах, в нефтеотделителях, факельных сепараторах [9,10]. Рассмотренные устройства показаны на Рисунке 1.3.

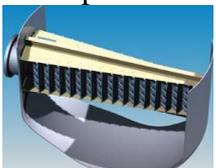
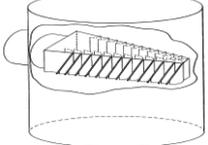


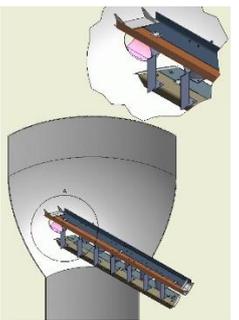
а) Sulzer; б) FMC Technologies; в) OMEGA

Рисунок 1.3 – Общий вид устройство ввода лопастного типа

Устройство ввода сырья выбирается в зависимости от скорости подачи смеси. Для массообменных аппаратов применяются лопастные, тангенциальные устройства ввода сырья и конструкции без распределителей. В Таблице 1.1 показаны основные типы и производители устройств ввода сырья [11-21].

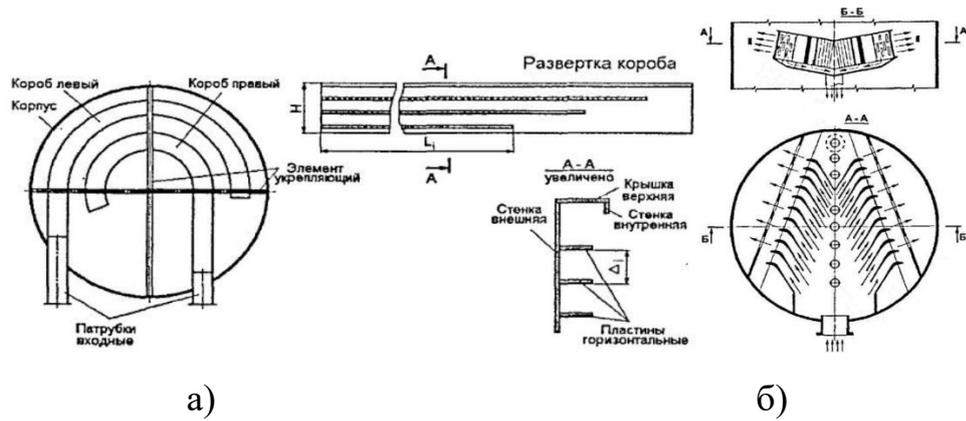
Таблица 1.1 – Основные виды устройств ввода сырья

№	Поставщик	Тип	Описание
1	2	3	4
1	Koch Glitch [11,12]	Vapor Horn 	Устройство ввода двухфазных потоков, с преимущественной паровой фазой. Сепарация происходит под действием центробежных сил. Внутренние способствует более равномерному распределению пара.
		Evenflow 	Устройство ввода преимущественно паровых потоков для обеспечения их равномерного распределения.
2	Sulzer [13,14]	Schoepentoeter 	Лопастное устройство наилучшим образом подходит для ввода паро-жидкостного питания из печи, или, например, для возврата нагретой кубовой жидкости в смеси с паром из кипятильника колонны.
3	Shell [15,16]		Лопастные устройства с гнутыми лопастями, с радиальным или тангенциальным вводом сырья.

1	2	3	4
4	Инжехим [17,18]		Применяются для предварительного сепарирования жидкости и равномерного распределения газожидкостного потока по сечению аппарата на входе массообменных колонных аппаратов.
5	ЗАО ПИРО [19,20]		Узел ввода лопастной с распределителем для ввода парожидкостных смесей.

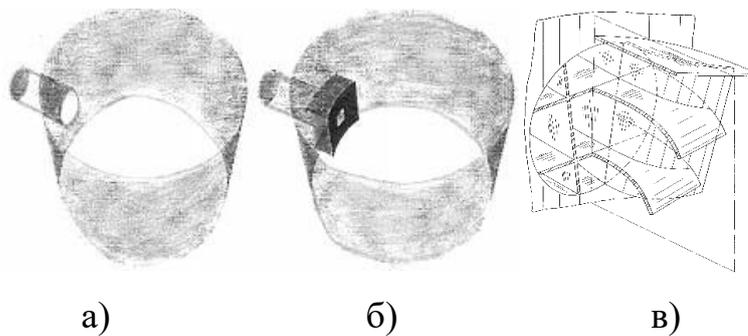
Приведенные в Таблице 1.1 устройства ввода могут быть изменены по конструкции для увеличения показателей протекающих в нем процессов. В работе [22] приведены усовершенствованные конструкции тангенциального [23] и лопастного устройств ввода сырья с целями увеличения степени сепарации сырья, равномерного распределения паровой фазы по сечению колонны, снижения гидравлического сопротивления устройства, упрощения конструкции. Конструкции данных устройств ввода сырья приведены на Рисунке 1.4. В работе описано промышленное испытание устройства с двумя разноуровневыми тангенциальными коробами, которое показало возможность повышения выхода светлых нефтепродуктов на 2% при его применении в вакуумной колонне установки АВТ.

Помимо приведенных выше конструкций также применяются более простые устройства ввода сырья с отбойниками или без них, пример таких устройств показан на Рисунке 1.5. Представленные устройства ввода описаны в литературе [11,24] и в патентах [16,25,26]. Сообщается, что данные устройства позволяют осуществлять сепарацию парожидкостного сырья с высокой долей пара.



а) устройство с двумя разноуровневыми тангенциальными коробами, б) лопастное устройство со сборником жидкости

Рисунок 1.4 – Устройства ввода сырья совместной разработки УГНТУ, ИПНХП и НУНПЗ [22,23]



а) без конструктивных элементов, б) с отбойником, в) с распределителем

Рисунок 1.5 – Простые конструкции узлов ввода

Для подачи жидкостного сырья могут использоваться различного вида распределительные устройства: желобчатые распределители, трубчатые распределители [27]. При небольших расходах жидкости может применяться ввод сырья прямо на полотно тарелки [28].

Основные виды устройств ввода сырья ограничиваются показанными выше конструкциями. Исследованию влияния полноты разделения парожидкостного сырьевого потока в зонах питания массообменных колонн, а также распределения парового потока по сечению аппарата, посвящено малое количество работ [29]. Тем не менее, имеются промышленные данные о положительном влиянии на работу колонны реконструкция устройства ввода сырья [30]. Например, реализация

комплекса мероприятий по реконструкции устройства ввода вакуумной колонны перегонки мазута К-5 на установке ЭЛОУ-АВТ ОАО «Орскнефтеоргсинтез» позволил увеличить отбор масляных фракций в 1,3 раза, доведя его до значения 80% от потенциала, и уменьшить содержание легких фракций в гудроне с 25% до 7% [30]. В следующей по ходу мазута колонне К-6 при этом увеличен отбор масляных фракций на 33% [30]. Описываемое устройство ввода было дооборудовано перекрестноточным каплеуловителем [31]. С точки зрения интенсификации работы оборудования за счет внедрения устройства ввода питания представляет интерес реконструкция каплеотбойника в узле ввода сырья в колонне Т2301 на ООО «Ставролен» [32]. В связи с увеличением производительности колонны на 15% существующий в узле ввода сетчатый каплеуловитель не обеспечивал требуемого показателя сепарации сырья – пирогаза. Наблюдалось повышение гидравлического сопротивления устройства ввода сырья и вторичный унос капель жидкости, вследствие чего значительно снижалась эффективность работы секции водной промывки пирогаза. Реконструкция узла ввода в данной колонне позволило обеспечить требуемое качество продукции.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что исследование работы устройств ввода сырья, влияние их конструктивных параметров на сепарацию и распределение газового потока является актуальной проблемой.

1.2 Моделирование гидродинамики устройств ввода сырья методом CFD-анализа

В данном разделе приведен обзор работ по моделированию гидродинамики потоков в устройствах ввода сырья.

В работе [33] представлены результаты CFD-моделирования, которые были выполнены для оценки профиля скорости пара на различных участках колонны. Было смоделировано 2 варианта ввода питания: подача парового и парожидкостного потока сырья.

Влияние жидкости на распределение скорости пара в открытом пространстве между входом и выходом незначительное в случае подачи парового сырья, но значительно для парожидкостного сырья. Поток пара считается несжимаемым. Температурными колебаниями пренебрегают. Эффект турбулентности учитывается с помощью стандартной модели турбулентности $k-\epsilon$. В статье описаны результаты моделирования процесса ввода сырья с применением лопастного устройства. Подача сырья в паровой фазе осуществлялась со скоростью 136 м/с. Результаты CFD-анализа приведены на Рисунке 1.6.

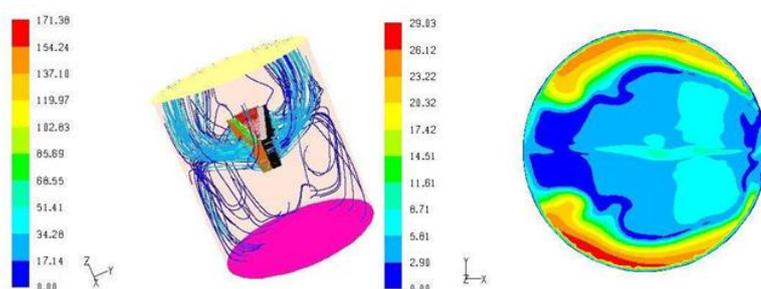


Рисунок 1.6 – Результаты моделирования лопастного устройства ввода парового сырья [33]

Из Рисунка 1.6 видно, что скорость потока снижается при переходе от штуцера подачи сырья в сечение колонны, однако распределение паров неравномерно: пар возле стенок корпуса имеет более высокую скорость, чем в области около оси колонны.

Аналогичные исследования были проведены и для ввода парожидкостного сырья в лопастной распределитель. Результаты показаны на Рисунке 1.7.

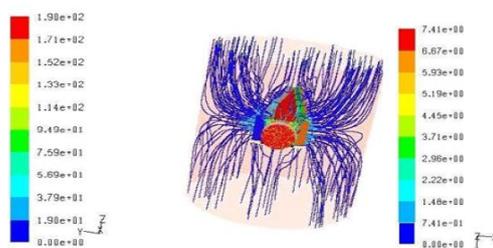


Рисунок 1.7 – Результаты моделирования лопастного устройства ввода парожидкостного сырья [33]

Полученные результаты хорошо согласуются между собой, а также, по заявлению авторов статьи, с результатами исследований, проведенным компанией Sulzer. Можно обнаружить, что распределение парового потока улучшается, по сравнению с подачей сырья только в паровой фазе.

Типичные расчетные сетки состоят из нескольких сотен тысяч до нескольких миллиона ячеек конечного объема, в зависимости от разрешения, необходимого для захвата геометрических деталей системы подачи. Простая геометрия может быть хорошо смоделирована структурированными многоблочными сетками. Они могут быть обращены автоматическими генераторами решетки с применением неструктурированных решеток «tetra» и шестиугольными решетками на различных точках узлов ввода. Результаты моделирования показаны на Рисунке 1.8 [34].

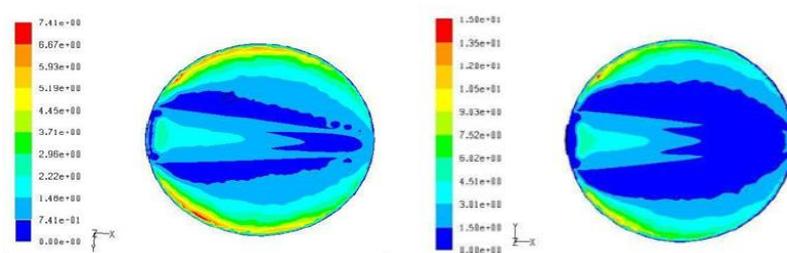


Рисунок 1.8 – Скорости пара и жидкости в узле ввода

Средой моделирования является водяной пар и вода. Моделирование выполнено с применением модели k-ε. Гидродинамическое поведение паров в колонне на разных участках анализировалось путем нахождения контуров скоростей потока и линий траекторий скоростей.

В работе [35] с применением CFD-анализа были исследованы следующие устройства ввода сырья (Рисунок 1.9):

- 1) без устройств ввода;
- 2) отбойник с отверстием – специально сконструированный дефлектор канала с боковыми отверстиями и центральным отверстием;
- 3) тангенциальное устройство ввода с направляющими лопатками;
- 4) лопастное устройство ввода Schoepentoeter;

5) трубный распределитель пара с двумя направляющими отверстиями.

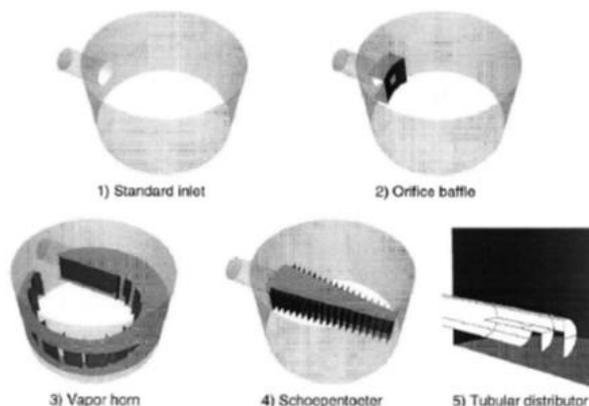


Рисунок 1.9 – Исследуемые типы узлов ввода [35]

Влияние наличия жидкой фазы на распределение скорости пара в открытом пространстве незначительно. Для количественной оценки однородности профиля скорости применяется коэффициент вариации K . Однако этот коэффициент не учитывает пространственного масштаба вариации. Равномерная подача пара должна быть достигнута на входе в слой насадки, поэтому для оценки различных систем подачи пара используется коэффициент K_p , который соответствует значению K , рассчитанному на горизонтальной плоскости под насадкой.

Для первых двух систем было проведено исследование по изменению параметров. Полученные данные показаны на Рисунке 1.10. Для отбойного устройства с отверстием возможно уменьшение K_p до значения 0,50. Предварительные результаты показывают, что трубчатый распределитель не обеспечивает лучшего распределения, чем система без устройства ввода сырья, так как пар направляется к стенкам. Рассмотренные конфигурации имеют малые размеры. В системах с большими размерами может быть повышена производительность. Для этого вида распределителя, влияние сечения и оптимальной геометрии трубки нуждаются в дальнейших исследованиях.

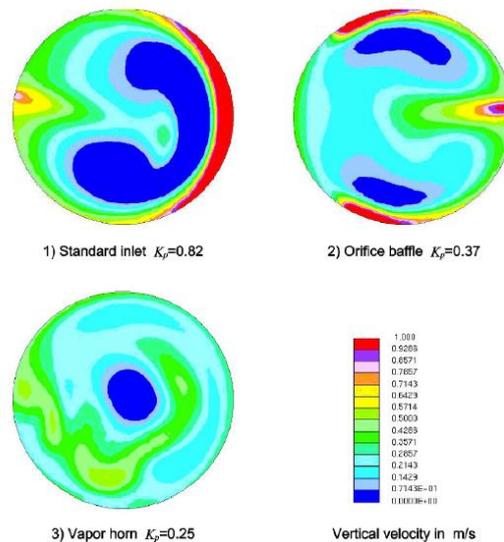


Рисунок 1.10 – Результаты CFD-моделирования: распределение скоростей потоков по сечению колонны [35]

Линии тока (Рисунок 1.11) иллюстрируют сложность трехмерного потока, возникающего в открытом пространстве между отстойником и насадкой. В случае без устройств ввода сырья поток пара пересекает колонну и ударяется об стенку напротив входного штуцера. Оттуда поток распространяется по стенкам, и часть насадки, ближайшая к точке налета, получает большую часть потока пара. Если ввести отбойник, то струя пара разделяется на две стенные струи и центральную струю. Если устройство правильно конструировано, стена препятствует встрече на противоположной стороне колонны и направлена к центру колонны где они встречаются поток пара, прошедший через отверстие. Поток, создаваемый тангенциальным устройством ввода, характеризуется вихрем, заставляющим поток подниматься с высокой вторичной составляющей скорости. Завихрение и наведенное увеличение в длине пути подачи помогают выровнять поле подачи. Важной характеристикой закрученного потока является низкая вертикальная скорость в центре. Это согласуется с более ранними выводами, моделирование также подтверждает, что лучшее распределение паров может быть достигнуто с помощью тангенциального входного устройства.

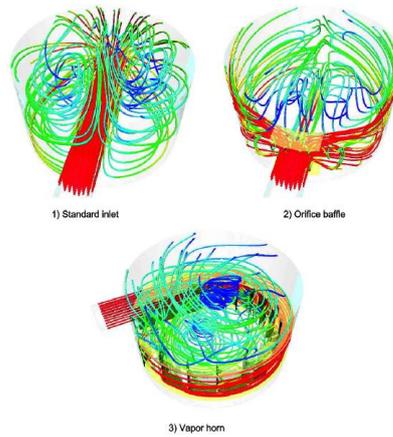


Рисунок 1.11 – Распределение потоков в зонах питания

В статье [36] показаны результаты CFD-анализа устройств ввода сырья, состоящие из перфорированных труб. Конструкция исследуемых устройств приведена на Рисунке 1.12. Принятая скорость подачи парового сырья 3 м/с. Распределение скоростей потока газа по сечению колонны показаны на Рисунке 1.13.

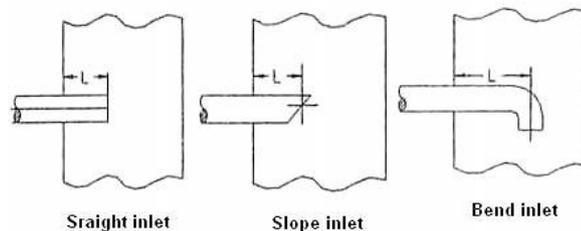


Рисунок 1.12 – Трубчатые входные устройства [36]

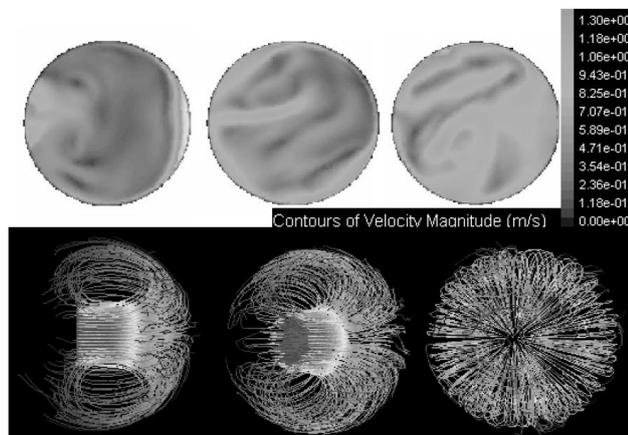


Рисунок 1.13 – Распределение скоростей по сечению узла ввода [36]

По результатам расчетов сделан вывод, чем больше диаметр колонны, тем более равномерно по ее сечению распределяется паровой поток. Наиболее хорошее распределение наблюдается при выходе сырья из подающей трубы в середине сечения колонны (Bend Inlet, Рисунок 1.12).

Следует также отметить подход к оценке распределения парового потока, которая определялась согласно коэффициенту неравномерности (M_f). Коэффициент неравномерности распределения рассчитывается для любого сечения колонны согласно уравнению:

$$M_f = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_i - U_0}{U_0} \right)^2} \quad (1.1)$$

где: U_i – скорость газа в ячейке i (локальная скорость);

U_0 – поверхностная скорость газа;

n – общее число ячеек.

В работе [37] приведены результаты исследования устройства ввода, в конструкцию которого входят два штуцера подачи сырья, и четырехпоточный распределитель (глухая тарелка). Результаты расчетов показаны на Рисунке 1.14.

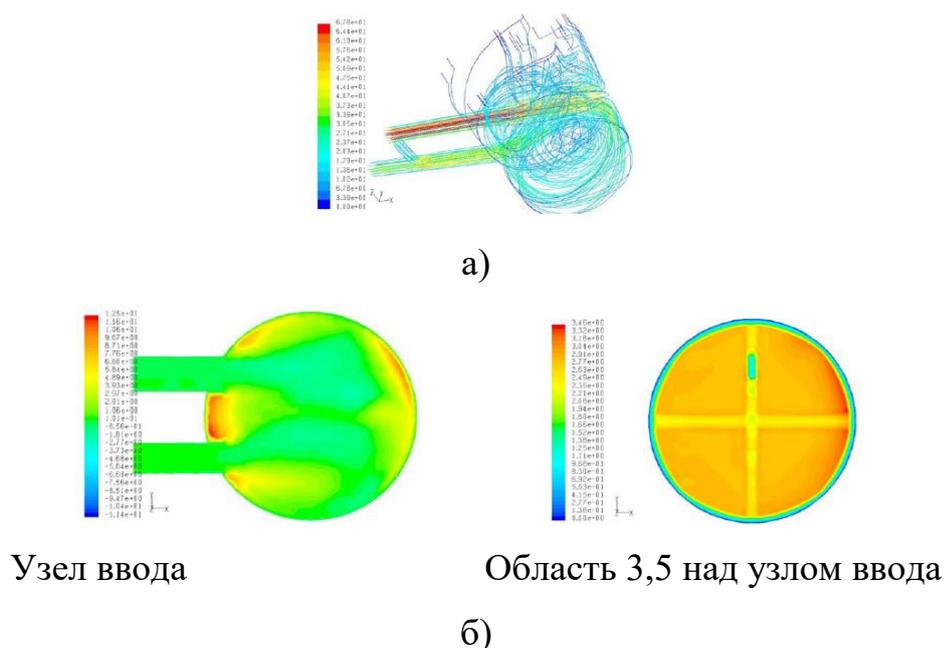


Рисунок 1.14 – Линии потоков (а) и распределение скоростей (б) в сечении колонны [37]

Применение пары штуцеров приводит к уменьшению скорости ввода сырья, что улучшает распределение (по сравнению с вводом через один штуцер). Моделирование проводилось с применением модели k-ε. В целом, можно обнаружить, что распределение визуально недостаточно равномерное. Для улучшения распределения предложена распределительная тарелка с четырьмя патрубками прохода пара. Результаты моделирования приведены на Рисунке 1.15.

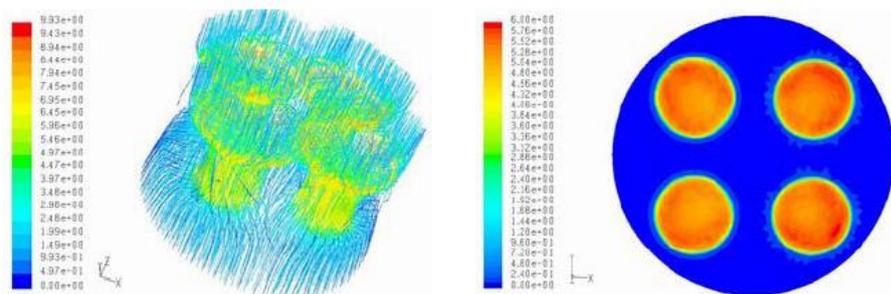


Рисунок 1.15 – Распределение скоростей в устройстве ввода с распределительной тарелкой [37]

Как показано исследователями, применение распределительной тарелки позволяет улучшить распределение газа в массообменном аппарате. Следует отметить, что конструкция распределительной тарелки может отличаться от представленной в статье, например, можно увеличить количество распределителей больше четырех.

К примеру, опубликована работа [38] по моделированию гидродинамики устройства ввода сырья с распределительной тарелкой. Для модели колонны с диаметром 3,2 м тарелка включала в себя 57 отверстий для прохода пара диаметром 18,8 см. Расчет произведен согласно модели k-ε, скорость подачи сырья 19 м/с. Результаты расчета приведены на Рисунке 1.16.

Таким образом, применение подобного рода тарелок позволяет улучшить распределение потока пара, что очень важно для массообменных аппаратов, особенно в случае применения противоточных насадочных контактных устройств.

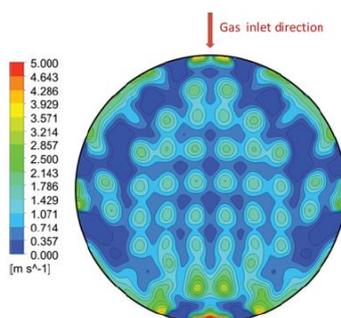


Рисунок 1.16 – Распределение скоростей потока газа над распределительной тарелкой [38]

В работе [39] представлены данные по CFD-анализу тангенциального узла ввода с лопастями (устройство «vapor horn»). Ввод сырья происходит через единый штуцер, поступающий поток делится на две части и направляется вдоль стенки колонны по направляющему устройству. Моделирование проводилось в ПО Fluent, модель турбулентности k-ε. Результаты расчетов приведены на Рисунке 1.17.

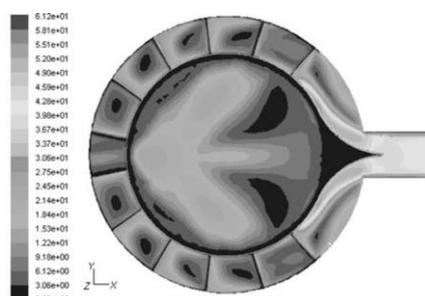


Рисунок 1.17 – Результаты моделирования [39]

Исследовано влияние количества лопастей, угла поворота лопастей, ширины канала на распределение скорости потока по сечению аппарата. Показана прямая зависимость между количеством лопастей и равномерностью распределения потока. Наилучший угол поворота лопасти является 30° (расчетный диапазон $0^\circ - 45^\circ$). Снижение ширины канала приводит к увеличению скорости потока, из-за чего уменьшается эффективность сепарации и возникает неравномерность распределения потока. Для примера, показанного в работе [39], оптимальная ширина канала – 16%. Однако, вероятно, что этот показатель в первую очередь

зависит от производительности колонны и физико-химических свойств сырья и может в каждом случае быть различным.

В насадочных колоннах паровая фаза поступает в нижнюю часть насадки через распределитель и поднимается к верхней части колонны. Роль систем ввода газа заключается в сепарации парожидкостного потока и распределения пара равномерно по всему поперечному сечению насадки. Скорость газа должна быть уменьшена, но в то же время входное устройство не должно блокировать поперечное сечение колонны или приводить к чрезмерному падению давления [40]. Тангенциальное устройство ввода пара является одним из простейших распределителей, но по своим характеристикам этот тип распределителя не подходит для больших колонн [41].

В работе [42] описаны результаты моделирования (Рисунок 1.18) распределительного жидкостного устройства. Показано, что наличие распределительного устройства, предназначенного для распределения жидкости, стекающей с насадки, и подачи газа, поступающего снизу, над устройством ввода сырья, нарушает равномерность распределения газа по сечению колонны. Отмечено, что данное устройство создает гидравлическое сопротивление, поэтому в ряде случаев, например, в вакуумных колоннах, оно может быть неприемлемо.

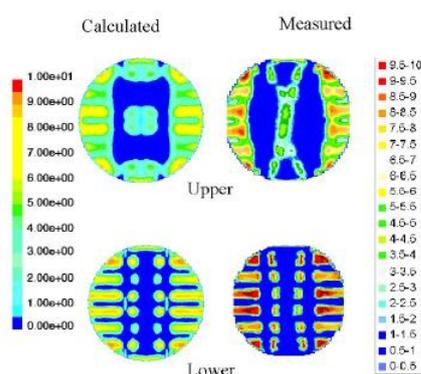
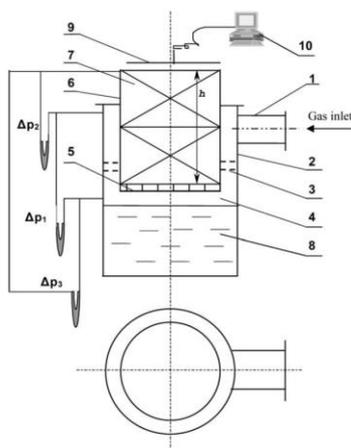


Рисунок 1.18 – Распределение газа над и под распределителем жидкости

Вопросу распределения газа по насадке посвящена работа [43]. Была экспериментально определена высота насадки, необходимой для обеспечения

максимального (но не полного) распределения газа. Общий вид экспериментального стенда приведена на Рисунке 1.19.



1 – вход газа, 2 – корпус стенда (цилиндр), 3 – решетка, 4 – свободное пространство, 5 – опорная решетка, 6 – корпус колонны, 7 – насадка, 8 – жидкость, 9 – анемометр, 10 – компьютер

Рисунок 1.19 – Стенд для оценки распределения газа по сечению насадки

Высота распределения газа составила минимум 0,7 м. Таким образом можно сделать вывод, что данная часть насадки не обеспечивает максимальной эффективности массообмена, т.к. распределение потоков пара и жидкости в нем неравномерно. Профиль скоростей над слоем насадки 0,7 м приведен на Рисунке 1.20.

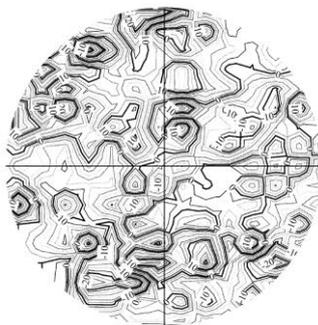


Рисунок 1.20 – Распределение скоростей над слоем насадки

В целом можно отметить, что применение лопатных устройств ввода позволяет обеспечить высокий уровень сепарации и распределение потока пара по сечению колонны. Тангенциальное устройство ввода сырья позволяет достичь еще более высокого уровня сепарации за счет действия центробежных сил, но хорошего распределения при этом не наблюдается. Поэтому одним из способов улучшения показателей работы устройств ввода сырья является комбинирование указанных выше конструкций.

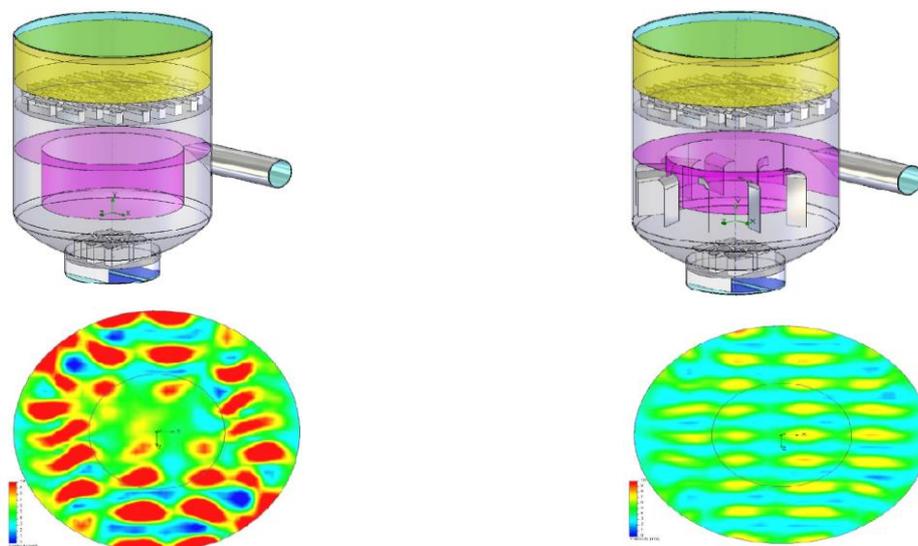


Рисунок 1.21 – Распределение парового потока над тангенциальным и тангенциальным с лопастями устройствах ввода сырья [44]

В работе [44] приведено сравнение тангенциального устройства ввода сырья и тангенциального устройства с лопастями. На примере вакуумной колонны показано (Рисунок 1.21), что последнее устройство сохраняет эффективность сепарации, а также несколько увеличивает равномерность распределения пара, поступающего на нижний слой насадки.

Обзор работ сведен в статье [45]. Подводя итоги обзора, можно отметить, что отсутствуют типовые методики выбора узлов ввода и их технологического и конструктивного расчета. В настоящее время различными исследовательскими коллективами проводятся работы по исследованию устройств ввода сырья, в том числе методами компьютерного моделирования гидродинамики потоков, что

свидетельствует о повышении интереса к данной тематике. Однако данные по зависимости работы устройств ввода сырья от различных конструктивных параметров, типа устройств ввода, характеристик сырьевого потока в настоящее время не опубликованы в научной и технической литературе, что делает изучение этой тематики актуальной.

1.3 Каплеотбойные устройства

В данном разделе приведен обзор каплеотбойных устройств, применяемых в сепарационном и массообменном оборудовании для удаления частиц жидкой фазы из газового потока. В сепараторах для разделения парожидкостной смеси на паровую и жидкую фазы применяют различные методы: инерционную очистку, разделение в поле центробежных или гравитационных сил. В зависимости от действующей силы выбирается конструкция сепаратора [1].

В инерционных газосепараторах размещается каплеотбойная насадка над штуцером ввода сырья. Сепарация потока происходит за счет нескольких поворотов потока газа и соударений с насадкой. Отделившаяся жидкость стекает вниз через переливные устройства.

Сетчатые газосепараторы конструктивно простые. Отбойник изготовлен из сетчатых гофрированных пакетов, помещенных на опорных элементах. Высота слоя каплеотбойника принимается в диапазоне 100-150 мм. Применение сетчатого каплеотбойника обосновано для отделения от газа капель жидкости диаметром 5-10 мкм. Пример использования вертикального сетчатого каплеотбойника приведен в патенте [46].

Сепараторы с центробежными прямоточными элементами работают за счет действия центробежных сил, что обуславливает их высокую эффективность. Под действием центробежных сил жидкость отбрасывается к стенкам центробежных элементов и выводится в нижнюю часть сепаратора, при этом паровой поток направляется вверх. Комплект центробежных элементов размещается на полотне тарелки [47].

Зачастую для обеспечения высокой степени очистки от капельной жидкости и механических примесей применяют центробежные сепарационные элементы. Например, в статье [48] описан опыт реконструкции сепаратора новой компрессорной станции с сохранением массогабаритных характеристик аппарата. В данном случае применены сепарационные элементы центробежного типа, разработанные ОАО «НИПИГазпереработка» [49]. Результаты реконструкции приведены в Таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты испытания сепараторов [48]

Параметры	До реконструкции	После реконструкции
Температура, °С	35...40	
Давление, МПа	1,1	
Расход газа через один аппарат, м ³ /ч	25000...28000	
Содержание капельной жидкости в газе, г/м ³		
- на входе в аппарат	10...15	10...15
- на выходе из аппарата	3...5	<0,003
Содержание механических примесей в газе, г/м ³		
- на входе в аппарат	0,005	0,005
- на выходе из аппарата	0,0015	<0,00005

В статье [50] рассмотрены особенности внутренних устройств сепараторов, модернизация которых осуществлялась по проектам ООО «Зульцер-Хемтех» и ДОО ЦКБН ОАО «Газпром». Новая конструкция отличается от базовой конструкции следующим:

1. Установлено лопастное устройство ввода парожидкостного потока (3) «Schoerpentoeter».
2. Установлены тарелки (4) мультикассетных сепараторов типа МКС.
3. Установлен сетчатый (6) каплеотбойник.
4. Установлены секции с центробежными сепарационными элементами (7, 9) типа Swirideckbox и сетчатый отбойник.

В процессе модернизации из корпуса штатного сепаратора были удалены все сепарационные и массообменные устройства за исключением приваренных к обечайке корпуса горизонтальных пластин, защитного листа.

Сепаратор, модернизированный по проекту ДОО «ЦКБН» ОАО «Газпром», отличается от сепаратора базовой конструкции следующим:

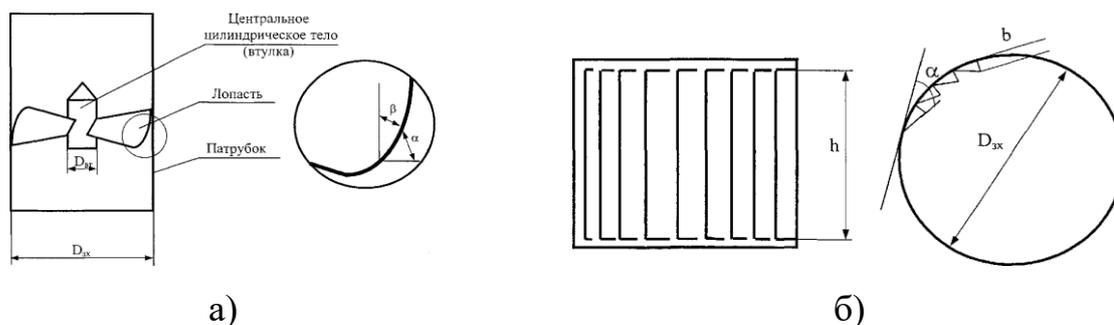
1. Установлен узел предварительной очистки с монтированным во входном патрубке аппарата устройством (3) отводы содержимого бункера сбора жидкости и мехпримеси.

2. Установлена секция центробежной очистки, включающая в себя узел минициклонов и промывочную тарелку с центробежными массообменными элементами, сетку фильтрующих устройств.

В процессе модернизации сепаратора из корпуса были удалены все сепарационные устройства за исключением, тангенциального входного устройства (2) с последующим монтажом новых внутренних устройств.

Представляют интерес работы по применению завихрителей в сепарационных устройствах [51,52]. Аксиальные завихрители (Рисунок 1.22а) состоят из ряда специально наклоненных лопастей, образующих каналы для прохода газа, при этом угол их наклона определяют степень закрутки потока. Тангенциальный завихритель (Рисунок 1.22б) состоит из лопастей различной формы, которые размещаются по образующей цилиндра под углом друг к другу, при этом соотношение суммарной площади щелей $S_{щ}$ к площади поперечного сечения патрубка $S_{сеч.}$ определяет степень закрутки потока.

В работе [52] сообщается, что наибольшая эффективность в сепараторах с аксиальными завихрителями достигается при угле наклона $35^{\circ} \pm 5^{\circ}$. Сепараторы с тангенциальным завихрителем более эффективны за счет тангенциального ввода потока сырья, что создает дополнительную центробежную силу по сравнению с сепаратором с аксиальным завихрителем.



Двт – диаметр втулки; $D_{зх}$ – диаметр зазора; $D_{зх}$ – диаметр завихрителя; h – высота лопатки; β – угол наклона лопатки к оси завихрения; α – угол наклона лопатки к поперечному сечению патрубка

Рисунок 1.22 – Схема аксиального (а) и тангенциального (б) завихрителя

Диаметр патрубка оказывает незначительное влияние на эффективность сепарации. Так, при диаметре 50 мм эффективность сепарации составляет 99,9 %, а при диаметре 300 мм – 99 %. Поэтому диаметр патрубка подбирается с учетом расхода газа.

По проведенным исследованиям длины сепарационного патрубка установлено, что с увеличением длины от 150 до 350 мм эффективность сепарации резко возрастает, а при дальнейшем увеличении длины остается почти постоянной. Поэтому длину патрубка центробежного элемента следует принимать равной трём диаметрам [51].

Известны также другие завихрители компании «Зульцер Хемтек» [53]: Shell VersiSwirl™ (завихритель, Рисунок 1.23а), Shell Swirltube Light™ (вихревая труба, Рисунок 1.23б), MKS Multi Cassette™ Mist Eliminator (кассетный каплеуловитель, Рисунок 1.23в). Устройства Shell Swirltube Light™ и MKS Multi Cassette™ Mist Eliminator обеспечивают высокую степень отделения капель от жидкости и рекомендуются производителем для концевых сепараторов, в то время как устройство Shell VersiSwirl™ может применяться для грязных сред в качестве первой ступени сепарации.



Рисунок 1.23 – Конструкции завихрителей Sulzer: а) Shell VersiSwirl™, б) Shell Swirltube Light™, в) MKS Multi Cassette™ Mist Eliminator [53]

Помимо завихрителей, представляют интерес насадочные устройства компании «Зульцер Хемтек» [54]: KnitMesh™ Mist Eliminator (ситчатый каплеотбойник, Рисунок 1.24а), KnitMesh V-MISTER™ (каплеотбойник из вязаной сетки, Рисунок 1.24б), KnitMesh™ 9797 High Performance Mist Eliminator (высокоэффективный каплеотбойник, Рисунок 1.24в), Mellachevron™ Mist Eliminator (шеvronный каплеотбойник, Рисунок 1.24г).

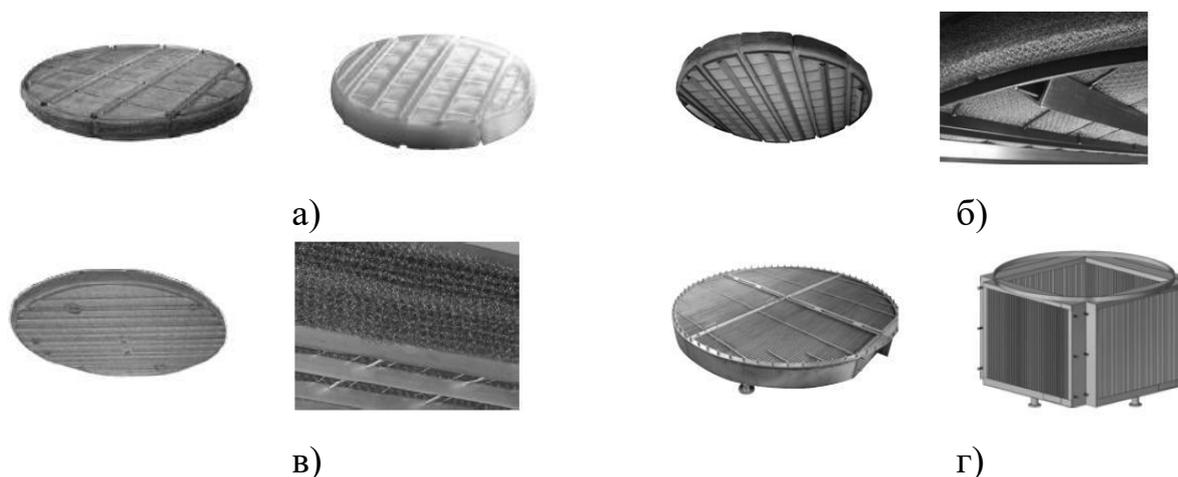


Рисунок 1.24 – Конструкции насадочных каплеотбойников Sulzer: а) KnitMesh™ Mist Eliminator, б) KnitMesh V-MISTER™, в) KnitMesh™ 9797 High Performance Mist Eliminator, г) Mellachevron™ Mist Eliminator [54]

В статье [55] представлен сепаратор сложной конструкции, включающий в себя: входной узел инерционной сепарации с коагулятором, сепарационная тарелка

с прямоточно-центробежными элементами, насадка структурированная (3 слоя), насадка сепарационная с пористым жгутом (3 слоя), тарелка с фильтрующими патронами. Данная конструкция обеспечивает заданную производительность 350 000 м³/час. Центробежные прямоточные элементы совместно с каплеотбойными сетками позволяют сепарировать капли жидкости 10 мкм и более. Фильтрующие патроны, установленные на выходе газа из сепаратора, обеспечивают сепарацию капельной жидкости размером менее 10 мкм. Унос жидкости из сепаратора не более 10 мг/м³.

В работах [56,57] описано применение кольцевых насадочных устройств для процесса улавливания жидкости. Керамические кольца Рашига должны быть уложены регулярно в определенном соотношении. Авторами отмечена высокая эффективность улавливания капель для данной конструкции, а также низкое сопротивление. Имеются патенты на усовершенствованную конструкцию кольцевой насадки, представляющей собой два установленных перпендикулярно и разделенных перегородкой полуцилиндра [58] и на способ расположения кольцевой насадки (Рисунок 1.25) [59].

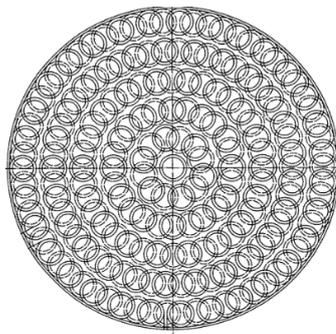
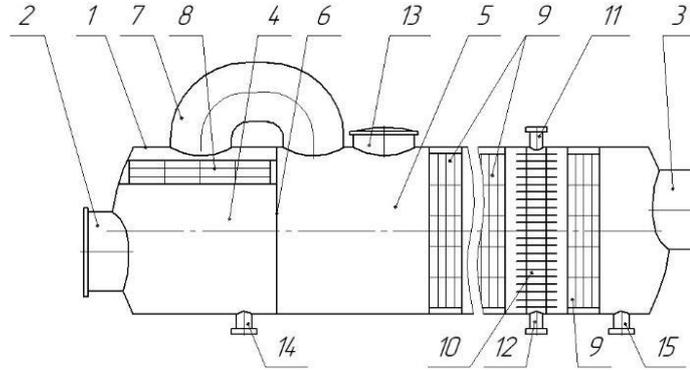


Рисунок 1.25 – Способ укладки кольцевой насадки каплеотбойника [59]

В УГНТУ разработан сепаратор – каплеотбойник с естественным и принудительным охлаждением газа, предназначенный для удаления паров и капельной жидкости из газовых потоков (Рисунок 1.26) [60,61].

Данное устройство представляет интерес в связи с наличием ряда достоинств: широкий диапазон изменения технологических параметров процесса

сепарации при помощи регулирования количества и типа газосепарационных элементов, возможность использования аппарата в качестве конденсатора, возможность очистки газа от мелкодисперсных механических частиц.



1 – корпус; 2, 3 – штуцера для ввода и вывода газа; 4, 5 – сепарационные камеры аппарата; 6 – перегородка; 7 – наружная труба; 8, 9 – калеотбойники; 10 – радиатор принудительного охлаждения; 11, 12 – патрубки для ввода и вывода хладагента; 13 – люк-лаз; 14, 15 – патрубки для отвода жидкости

Рисунок 1.26 – Общий вид сепаратора – каплеотбойника с принудительным охладителем газа

В ряде процессов, например, в градирнях, используется насадка из полимерных материалов. Цель насадки – охлаждение оборотной воды и сепарация улетающих капель. Имеется ряд работ научного коллектива УГНТУ, выполняющего исследования полимерных насадочных устройств [62-64]. Полимерные насадочные устройства имеют ряд достоинств, такие, как: малая масса устройства, малое гидродинамическое сопротивление, обеспечение пленочного режима течения воды по поверхности насадки [65], а также следует отметить повышенную устойчивость к коррозии.

К перспективным видам отбойных устройств относится насадочный каплеотбойник [66]. Каплеотбойник представляет собой блок насадки, выполняемый из просечно-вытяжного листа (далее – ПВЛ), сетки или гофры (преимущественно сетки и ПВЛ). Блоки насадки могут располагаться, в зависимости от газовой нагрузки и содержания в сырьевом газе капельной

жидкости и механических частиц, горизонтально (Рисунок 1.27а) или вертикально (Рисунок 1.27б). Причем в случае вертикального расположения каплеотбойника можно изменять конфигурацию и геометрические размеры блоков, а также использовать несколько ступеней сепарации.

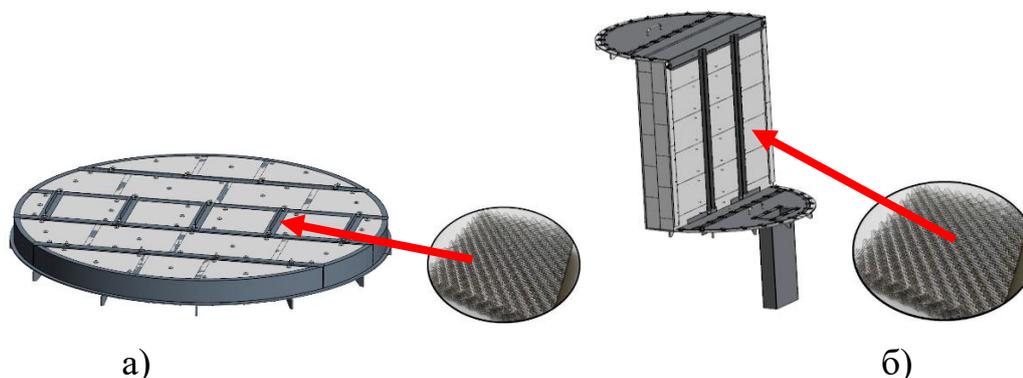


Рисунок 1.27 – Насадочные каплеотбойники: а) горизонтальный (противоточный), б) одноступенчатый вертикальный (перекрестноточный) [66]

Для увеличения эффективности работы сепаратора и снижения капельного уноса жидкости с газом можно применить несколько ступеней вертикальных насадочных каплеотбойников [67]. Повышение качества сепарации при этом обуславливается не только наличием дополнительных каплеотбойников, но и за счет поворотов потока газа и действие при этом сил инерции на капли жидкости. В случае низкой концентрации газовой фазы для увеличения эффективности сепарации можно применять орошаемый вертикальный насадочный каплеотбойник [68]

Завершить обзор хотелось бы данными, представленными в работе [69]. На Рисунке 1.28 представлена зависимость содержания капельной жидкости в газе сепарации от габаритов аппарата. Принято, что сепарации подвергалось $30000 \text{ м}^3/\text{ч}$ газа с содержанием углеводородов C_{3+} $500 \text{ г}/\text{м}^3$, температура $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Следует отметить, что увеличение размеров сепаратора влечет за собой образование капель конденсата после прохождения газа через отбойник. Это связано с влиянием температуры окружающей среды и большой площадью поверхности сепаратора.

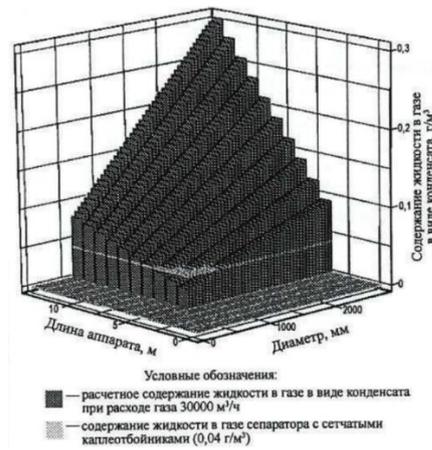


Рисунок 1.28 – Зависимость содержания капельной жидкости в газе сепарации

В ходе НИР был проведен патентный обзор каплеотбойных устройств. Приведен обзор патентов за последние 5-6 лет.

В работе [70] представлен газожидкостный сепаратор, состоящий из входной и каплеотбойной секций. В каплеотбойную секцию устанавливается завихритель на внутренней стенке камеры. Во входной камере устанавливается конусный экран ниже трубопровода отвода газа, и сетчатый стакан. Кроме этого, в аппарат устанавливается шнек с радиальным зазором по отношению к сужающимся сверху вниз сетчатому стакану. Разделение происходит под действием центробежных сил.

Некоторое усовершенствование данного устройства описано в работе [71]. Сепаратор содержит кольцевые полки, для увеличения завихрения в аппарате.

В работе [72] представлен сепаратор конструкции «Инжехим», состоящий из узла ввода, сетчатого и прямоточного каплеуловителя. Блок насадки орошается жидкостью в восходящем потоке, видимо, для увеличения массообмена и улучшения разделения. Заявлено, что сепаратор обладает высокой эффективностью при $F > 3 \text{ Па}^{0.5}$.

Центробежные сепараторы постоянно совершенствуются и патентуются. Например, известен патент [73] на циклонной каплеуловитель Кох-Глитч. Способ отделения капель жидкости от газа в потоке пара, протекающего через циклон в циклонном каплеуловителе, включает этапы:

- пропускание потока пара через завихритель в циклон для сообщения потоку газа вихревого движения при его входе во внутреннюю камеру;

- удаление капель жидкости с внутренней поверхности внутренней стенки посредством пропускания их вместе с частью газа через щели во внутренней стенке в наружной камере, окружающую внутреннюю камеру;

- улавливание капель жидкости посредством пропускания потока сквозь волокнистую прокладку в наружной камере;

- удаление другой части газа из внутренней камеры через открытый выпускной конец внутренней камеры для вывода из циклона.

Для увеличения степени очистки можно применять коалесцирующие блоки. Такое предложение высказано в работе [74]. Предложен вариант газодинамического сепаратора, оснащенный сепарационным устройством с крышкой и патрубком и коалесцирующим блоком.

В патенте [75] описан сепаратор, разделение в котором происходит при прохождении потока через множество пластин. Они расположены параллельно друг другу и разнесены друг от друга для образования проточного канала между ними, при этом каждая из пластин имеет множество гофров. Заявляется снижение гидравлического сопротивления и повышение КПД сепарации в каналах, по сравнению с традиционными типами каплеотбойных устройств.

Существует спиральный сепаратор, описанный в работе [76]. Разделение происходит за счет центробежных сил, которые образуются благодаря многозаходной винтовой колонне. Винтовая многозаходная колонна закрыта обечайкой в виде цилиндрического патрубка, заглушенного с одной стороны. Внутри обечайки соосно на выходном патрубке установлено отсекающее устройство в виде конусного элемента. В верхней части обечайки установлен каплеуловитель. Комплекс решений позволяет повысить эффективность отделение жидкости от газов и паров.

Для сравнения различных типов каплеотбойных устройств представляют интерес данные работ [77,78]. По их результатам определены удельные металлоемкости различных типов сепараторов, представленные в Таблице 1.3. Разница величин удельной металлоемкости частично объясняется случайным выбором аппаратов разного назначения. Минимальная масса аппаратов с

центробежными и инерционными элементами обоснована высокими скоростями протекающих в них процессов.

Таблица 1.3 – Удельная металлоемкость некоторых сепараторов

Тип сепаратора	$K_{уд.м} = \text{Мг, кг}/(\text{тыс. нм}^3/\text{сут})$
Гравитационные сепараторы	15...25
Сепараторы с жалюзийными насадками	5...12
Лучшие зарубежные сепараторы	1...5
Сепараторы с инерционными элементами	3,0
Сепараторы с центробежными элементами	0,6

В настоящее время наблюдается тенденция по снижению капельного уноса жидкости с газом в магистральные трубопроводы до $5 \text{ мг}/\text{м}^3$. В 2013 году был издан Стандарт Газпром [79], в котором указано данное требование по каплеуносу и способ его измерения. В статье [80] приведен отчет о проведении в период с сентября 2015 по май 2017 г. на блоке газосепаратора 20С-2 УКПГ № 1 Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения сравнительных испытаний каплеотбойных устройств различных типов и производителей с целью снижения каплеуноса. Определены фактические показатели работы газосепараторов с установленными различными комбинациями сепарационных устройств. Результаты приведены в Таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Результаты определения капельного уноса жидкости из газосепараторов 20С-2 ГП-1 по методике ООО «Газпром ВНИИГаз» [80]

№ ТН	Проект	Расход газа, тыс. ст $\text{м}^3/\text{ч}$	Давление, МПа	Температура, °С	Перепад давления в сепараторе, кПа	Унос, мг/ст. м^3
1	2	3	4	5	6	7
1	ООО «СервисСпецМаш» на первой ступени сепарации центробежно-вихревые элементы (ЦВЭ) ЦВ-80-320-НС); коалесционные элементы CS604LGH13 производства ООО «Палл Евразия» (г. Зеленоград) на второй ступени сепарации.	427,0	5,44	-24,2	19,1	37,3

1	2	3	4	5	6	7
2	Устройства производства ООО «Сервис СпецМаш»: – секция ЦВЭ ЦВ-80-320-НС на первой ступени сепарации; – сепарационные модули ЦС40П-П-ПФС3/10-НС-02/921 на второй ступени сепарации.	433,7	5,07	-21,0	7,7	65,8-75,1
3	ООО «Палл Евразия»: на первой ступени сепарации установлена секция с двумя пластинчатыми каплеотбой-ными устройствами, вторая ступень сепарации укомплектована коалес-сионными элементами CS604LGH13.	467,4	5,45	-24,2	19,2	60,0-66,4
4	Изменены коалессионные элементы CS604LGH13 на фильтроэлементы другого производителя.	460,3	5,31	-26,0	2,6	156,8
5	Фильтроэлементы, увеличенная длина входного трубопровода	412,9	5,39	-24,4	9,4	10,6

Таким образом, можно сделать вывод, что в настоящее время еще не разработаны (или не опубликованы в научной и технической литературе) [81] решения по снижению уровня каплеуноса до 5 мг/м^3 . Разработка новых и совершенствование уже существующих конструкций каплеотбойных устройств в настоящее время является актуальной задачей.

Выводы по главе 1

На основе изученной информации по устройствам ввода сырья можно отметить, что в настоящее время применяются лопастные, тангенциальные устройства ввода сырья, а также простые типы устройств ввода сырья с отбойниками. Проблема моделирования гидродинамики и совершенствования конструктивного оформления устройств ввода сырья имеет высокий интерес среди научного сообщества, однако, отсутствуют обобщенные теоретические или экспериментальные работы по изучению устройств ввода сырья и общепризнанные методики расчета устройств ввода сырья. Кроме этого, в настоящее время является важной проблема снижения капельного уноса жидкости с газом сепарации.

Требование к капельному уносу не более 5 мг/м^3 в настоящее время не было достигнуто, как следует из опубликованных результатов промышленных пробегов.

Таким образом, показана актуальность:

- проведения исследований гидродинамики различных видов устройств ввода парожидкостного сырья с целью определения диапазона их эффективной работы;
- определения зависимостей конструктивных параметров устройств ввода сырья на эффективность их работы;
- разработки новых конструкций устройств ввода сырья с более высокими показателями эффективности работы;
- исследования гидродинамики каплеотбойных устройств с целью определения диапазона их эффективной работы.

Глава 2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной главе рассмотрены методы математического и физического моделирования устройств ввода сырья отбойного и лопастного типов (всего исследовано 8 конструкций), насадочных каплеотбойных устройств противоточной (горизонтальной) и перекрестноточной однополосной (вертикальной) конфигураций.

Расчётные исследования по влиянию степени сепарации на энергозатраты 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, которая 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.

Физическое моделирование насадочных перекрестноточных каплеотбойных устройств проводилось путем экспериментального исследования на стенде, на среде воздух-вода.

2.1 Объекты исследования

Объектами исследования в главе 3 выступают устройства ввода сырья, приведенные на Рисунке 2.1. Данные типы устройств ввода сырья были описаны в литературном обзоре. Высота устройства ввода сырья для всех вариантов принята равной 800 мм. Внутренний диаметр корпуса колонны принят 2000 мм. Диаметр штуцера ввода сырья равен 500 мм.

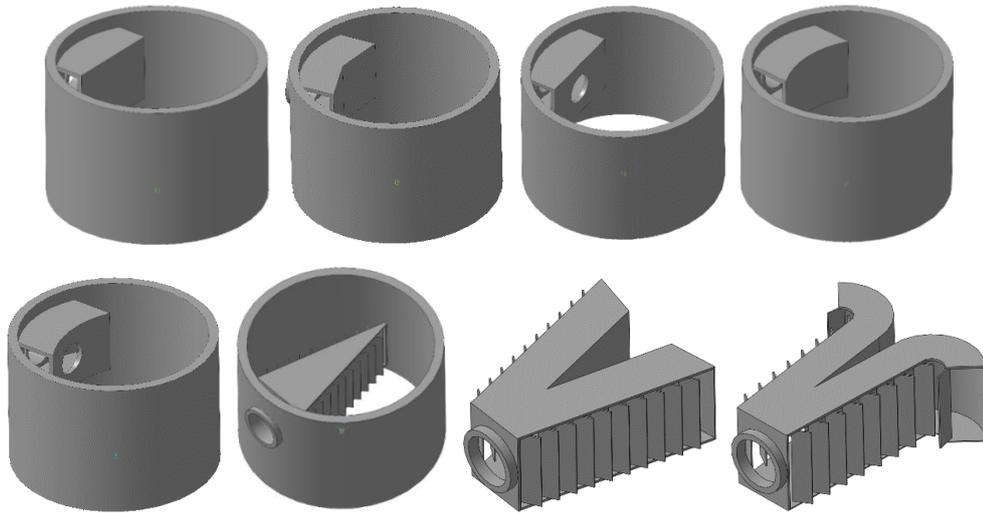


Рисунок 2.1 – 3D-модели устройств ввода сырья для проведения расчетного исследования гидродинамики

Объектами исследования в главе 4 выступают каплеотбойные устройства. 3D-модели устройств приведены на Рисунках 2.2, 2.3.

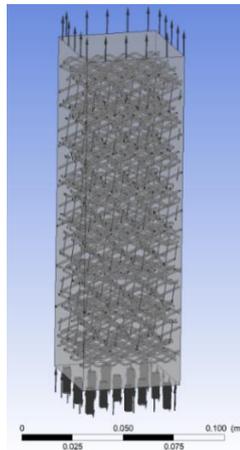


Рисунок 2.2 – 3D-модель элемента противоточного каплеотбойника

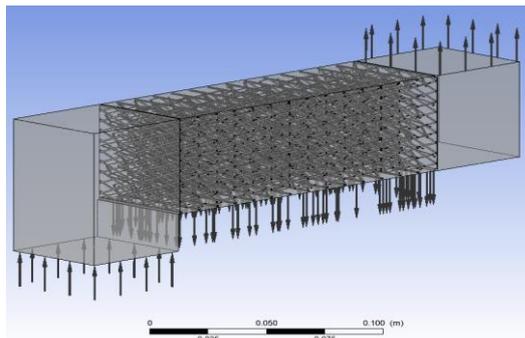


Рисунок 2.3 – 3D-модель элемента перекрестноточного каплеотбойника

2.2 Методы исследования

2.2.1 Математическое моделирование исследуемых процессов с применением программного обеспечения

Программа Unisim Design предназначена для разработки математических моделей химико-технологических процессов (переработка нефти, нефтехимия, и др.) и их оптимизации. Математическая модель строится на основе статической информации работы установки, включающей материальный баланс установки, режимные параметры технологического процесса и результаты лабораторного анализа сырья и продуктов.

Моделирование технологического процесса задается системой одновременно решаемых нелинейных уравнений. Данная система уравнений позволяет определить основные термодинамические параметры всех необходимых материальных потоков, расходов и составов с использованием принятых расчетных моделей свойств и процессов. На основе наиболее эффективного алгоритма, рассчитываются параметры системы (температура, расход, состав и т.д.), при этом разработанные алгоритмы корректируются именно для каждого элемента в зависимости от условий процесса. Порядок расчета параметров системы можно задавать вручную или определять автоматически. При наличии рециклов разрабатывается технологическая схема, в которой рецикловые потоки обрываются, в результате чего создаётся последовательность сходящихся значений. Указанные значения (параметры) принимаются замещением параметров, рассчитанных при предыдущем этапе расчета технологической схемы [82].

Разработка математической модели в программном пакете Unisim Design начинается с выбора подходящего для изучаемого технологического процесса термодинамического пакета. Правильный выбор пакета термодинамических свойств является одним из важнейших условий моделирования процесса [82].

В основе термодинамических пакетов лежат уравнения состояния, связывающие между собой термодинамические (макроскопические) параметры

системы, такие, как температура, давление, объём, химический потенциал и другие. Для расчета задач, относящихся к нефте- и газоперерабатывающей промышленности, в основном рекомендуется применять термодинамический пакет Пенга-Робинсона (Peng-Robinson) [83]. В большинстве случаев уравнения состояния модели обеспечивают высокую точность расчетов для большинства углеводородных систем в широких диапазонах условий, но их область применения ограничена неполярными или слабополярными растворителями. Неидеальные системы лучше рассчитывать с помощью моделей активности [84].

Первоначально работа технологической схемы колонн рассчитывается без детализации системы теплообмена – имеет значение только количество теплоподвода и теплосъема.

Для начала моделирования задаётся конструкция колонны, количество теоретических или реальных тарелок, способ теплоподвода и теплосъема. Затем определяются или рассчитываются основные технологические параметры – расходы потоков, температура верха и низа колонны, давление на верху колонны и гидравлическое сопротивление внутренних устройств, давление в зоне питания, флегмовое и паровое числа, эффективность (КПД) внутренних устройств [85].

Для выполнения расчетов гидродинамики потоков применен программный комплекс ANSYS CFX. В нашем случае при помощи данного ПО был выполнен расчет гидравлики процессов, происходящих в устройствах ввода сырья и в каплеотбойных устройствах. Гибкая архитектура программы позволяет проводить моделирование не только простых однофазных систем, но и многофазных систем, к которым относятся потоки, поступающие в исследуемые устройства.

Работа программы ANSYS CFX заключается в решении уравнений гидродинамики потоков жидкости: уравнение Навье-Стокса, уравнение сплошности и неразрывности потока, уравнение Эйлера и уравнение Бернулли, материальный и энергетический балансы. Система уравнений имеет вид [86]:

- уравнение неразрывности потока:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \text{ или } \nabla \vec{V} = 0 \quad (2.1)$$

- уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial U_k}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_k}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_j} \right) \text{ или } \rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \vec{V}) \quad (2.2)$$

где: u_j, u_k – составляющие скорости потока в направлении соответствующих осей декартовой системы координат x_j (здесь $j = 1, 2, 3, k = 1, 2, 3$);

p – давление;

t – время;

ρ – плотность жидкости;

μ – коэффициент динамической вязкости;

\vec{V} – вектор местной скорости потока

∇ – оператор Гамильтона.

- уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial(\rho h_t)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\rho \nabla \vec{V} h_t) = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(\vec{V} \vec{\tau}) + \vec{V} \vec{S}_M + S_E \quad (2.3)$$

$$h_t = h_s + \frac{\vec{V}^2}{2}$$

$$h_s = h_s(T, p)$$

где: T – температура;

h_t – полная энергия;

h_s – статическая энергия;

S_M – величина, характеризующая импульс;

S_E – величина, характеризующая энергию;

λ – коэффициент теплопроводности.

- уравнение состояния:

$$\rho = \rho(T, p) \quad (2.4)$$

В данной системе уравнений, характеризующей турбулентное движение вязкой несжимаемой ньютоновской жидкости, любые мгновенные значения гидродинамических параметров представляются в виде суммы их осредненных величин и пульсационных составляющих. Гидродинамическая величина является случайной величиной, осредненная величина показывает ее математическое ожидание, пульсационная составляющая является дисперсией случайной

величины. После упрощения уравнений Навье – Стокса, помимо неизвестных средних скоростей появляются произведения средних отклонений, которые могут описываться различными моделями. Наиболее часто применяемой моделью является модель турбулентности k-ε [87]. В ней уравнения движения жидкости преобразуются к виду, в котором добавлено влияние флуктуации средней скорости (в виде турбулентной кинетической энергии) и процесса уменьшения этой флуктуации за счёт вязкости (диссипации). В данной модели решается 2 дополнительных уравнения для транспорта кинетической энергии турбулентности (2.5) и транспорта диссипации турбулентности (2.6):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} - \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2\mu_t E_{j,k} E_{j,k} - \rho \varepsilon \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} - \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{j,k} E_{j,k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.6)$$

где: $E_{j,k}$ – компонент скорости деформации;

μ_t – турбулентная вязкости, определяемая по формуле:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

Константы σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ получены опытным путем и для широкого диапазона турбулентных потоков составляют [86,87]:

$$C_\mu = 0,09; C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{2\varepsilon} = 1,92; \sigma_k = 1,00; \sigma_\varepsilon = 1,30.$$

Уравнения решаются конечно-объемным методом [88]. Рассчитываемое пространство разделяется на элементарные объемы, таким образом, чтобы узловые точки находились только в одном элементарном объеме. По каждому элементарному объему интегрируются дифференциальные уравнения, в результате чего определяется дискретный аналог системы дифференциальных уравнений. Интегралы вычисляются с применением кусочно-непрерывных функций, описывающих изменения между узлами сетки. Решение дискретных уравнений осуществляется с применением метода многосеточного алгебраического сопряжения (Algebraic Computed Multigrid – AMG) [89]. В данном методе применяется неявная связанная схема решения СЛАУ, поэтому затраты

вычислительных ресурсов на решение напрямую зависят от количества узлов сетки [90]. Следует отметить, что имеется возможность проведения параллельных вычислений, с целью наиболее полного использования возможностей машины и экономии времени расчета [91]. Возможно применение смешанных форм расчетных сеток, состоящих из различных форм элементарных объемов. Метод конечных элементов позволяет проводить расчет системы с достаточно высокой точностью даже на грубых сетках за счет точного интегрального сохранения расчетных балансных величин (масса и энергия) на любой группе элементарных объемов при любом количестве узлов.

Для построения 3D-модели исследуемых устройств применена программа КОМПАС-3D. Помимо построения 3D-модели самого исследуемого устройства необходимо строить замкнутый объем системы, в пределах которого будет проводиться моделирование. В случае моделирования устройств ввода сырья, это часть колонны с устройством. В случае моделирования каплеотбойника это входной и выходной каналы системы. С целью дальнейшего моделирования гидродинамики производится импорт геометрии, путем сохранения 3D-модели в универсальном формате IGES. Далее в модули Design Modeler программы ANSYS CFX производится загрузка модели, создание внутреннего объема [92].

На следующем этапе работы производится создание расчетной сетки в исследуемом конечном объеме. Параметры расчетной сетки влияют на точность полученной модели, а также на трудоемкость расчета, затраты ресурсов машины. Для создания сетки предусмотрен модуль Mesh в программе ANSYS CFX, но возможно создание сетки с применением сторонних программ. Модуль Mesh может генерировать гексагональные и тетраэдральные сетки. Также ANSYS CFX способен переносить результаты расчетов с грубых сеток на более мелкие. Главный принцип построения расчетных сеток – генерация максимально большого количества компонентов с минимальными размерами, чем выше количество узлов, тем больше точность получаемой модели [93].

На следующем этапе вводятся исходные данные для проведения расчета гидродинамики потока в модуле CFX-Pre (так называемый предпроцессор). В

данном модуле задается тип поверхностей (Inlet – поверхность ввода потока, Outlet – поверхность вывода потока, Opening – открытая поверхность, Wall – твердая стенка), расход и составы входящих потоков, условия на выходящих сечениях, параметры расчета (точность, кол-во итераций и т.д.), условия в исследуемом объеме. Модуль позволяет дополнить расчет своими формулами для вычисления самых различных величин и параметров. Причем эти данные можно ввести непосредственно в CFX-Pre, либо с помощью языков программирования [94].

После ввода всех исходных данных происходит непосредственно расчет гидродинамики в модуле CFX-Solver (решатель). Как было указано выше, имеется возможность распараллеливания расчетов, причем, как в пределах одной машины, так и на многопроцессорных рабочих станциях. Во время выполнения вычислений на экране компьютера отображается информация о сходимости основных уравнений, а также в таблицах – результаты расчета в числовом виде [95].

После успешного завершения расчета необходимо перейти в модуль CFX-Post (так называемый постпроцессор), который необходим для выгрузки и визуализации результатов моделирования гидродинамики. С применением графической библиотеки OpenGL в данном модуле можно визуализировать различные расчетные величины, например, концентрация вещества, скорость, температура или давление, различными способами: вектор, контур, градиентная заливка, поверхность и т.д. [96].

Программный комплекс ANSYS CFX успешно применяется для моделирования гидродинамических процессов в широком спектре технологического оборудования для однофазных, двухфазных и многофазных систем. В частности, имеется множество работ по моделированию гидродинамики в устройствах ввода сырья [33-45], подробно рассмотренных в главе 1.2. С помощью CFD-анализа проведены исследования процессов смешения в различных видах статических смесителей [97-100]. Представляют интерес работы по исследованию гидродинамики на тарельчатых ситчатых и клапанных контактных устройствах [78,101,102], распределительных устройствах [27,103,104]. Смоделирована гидродинамика потоков в насадочных контактных устройствах

массообменных колонн для однофазных [105-107] и двухфазных [108,109] потоков, эта задача является похожей на задачу моделирования гидродинамики процессов, протекающих в насадочных каплеотбойниках. Насадочные контактные устройства и насадочные каплеотбойники имеют схожую структуру, но отличаются удельной поверхностью насадки, которая в случае каплеотбойников в 2-3 раза выше.

2.2.2 Физическое моделирование каплеотбойных устройств на стенде

Каплеотбойник представляет собой блок насадки, выполняемый из просечно-вытяжного листа (далее – ПВЛ), сетки или гофры (преимущественно сетки и ПВЛ). Блоки насадки могут располагаться, в зависимости от газовой нагрузки и содержания в сырьевом газе капельной жидкости и механических примесей, горизонтально или вертикально [66]. Причем в случае вертикального расположения каплеотбойника можно изменять конфигурацию и размеры блоков, а также использовать несколько ступеней сепарации (см. Рисунок 1.28).

Схема экспериментальной установки представлена на Рисунке 2.4. Стенд представляет набор металлических царг, соединенных между собой болтами. Стенки царг выполнены из органического стекла, благодаря которым можно визуально наблюдать за работой исследуемых блоков. Также предусмотрен прибор для определения содержания воды в выходящем воздухе. Конструкция установки в зависимости от задач исследования позволяет устанавливать одну или две ступени каплеотбойных устройств. В стенде имеются отборы давления, которые подключены к блоку водяных дифференциальных манометров. Манометрами измеряется давление на входе в стенд и перепад давления. Стенд устанавливается на бак. Конструкция бака предусматривает наличие воздухораспределителя и отсека для сбора отбитой жидкости.

Воздух в колонну подается с помощью газодувки. Воздух в колонну поступает по трубопроводу, на котором установлена диафрагма и клапан с возможностью ручного управления. Термометром измеряется температура после

диафрагмы. Вода подается насосом. На трубопроводе подачи жидкости установлена диафрагма и клапан с возможностью ручного управления.

Проведено исследование перекрестноточной (вертикальной) каплеотбойной насадки со следующими характеристиками: высота слоя 0,60 м, длина полосы 0,50 м, ширина 0,10 м. Сечение прохода 0,30 м². Сечение в окнах 0,087 м². Удельная поверхность насадки 520 м²/м³.

Отметим, что стенд является универсальным и может применяться не только для исследования каплеотбойных устройств, но и внутренних контактных устройств: противоточные и перекрестноточные насадки, тарелки [110].

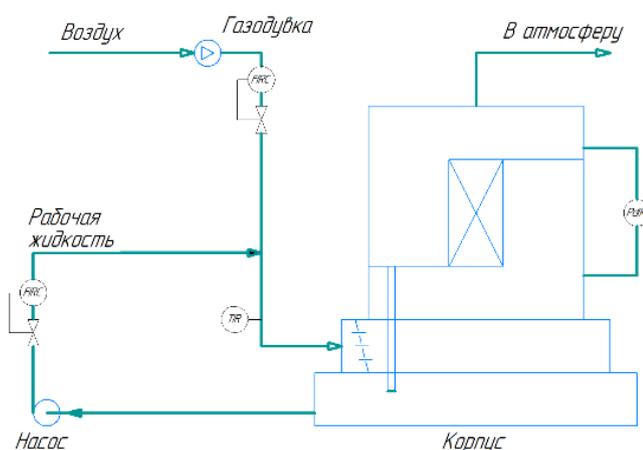


Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной установки

Выводы по главе 2

Рассмотрены методы физического и математического моделирования исследуемых процессов. Расчетное исследование влияния доли уноса жидкой фазы в зоне ввода сырья на энергозатраты процесса ректификации проводилось методом математического моделирования в программном обеспечении Unisim Design. Исследования гидродинамики устройств ввода сырья проводилось методом математического моделирования в программном комплексе ANSYS CFX. Исследования гидродинамики насадочных каплеотбойных устройств проводилось методами физического моделирования на стенде и математического моделирования в программном комплексе ANSYS CFX.

Глава 3 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ ВВОДА СЫРЬЯ

В данной главе проведено расчетное исследование влияния эффективности работы устройств ввода сырья на энергозатраты процесса ректификации, показано, что унос жидкой фазы в зоне ввода сырья повышает энергозатраты процесса разделения, чем обоснована актуальность исследования гидродинамики устройств ввода сырья. Для сравнительного анализа и оценки эффективности работы предложены критерии работы устройств ввода сырья, характеризующие сепарацию в зоне ввода сырья и распределение парового потока по сечению укрепляющей секции колонны. Методом CFD-анализа выполнены расчетные исследования гидродинамики пяти типов отбойных устройств ввода сырья, типового одноканального лопастного устройства ввода сырья, двух принципиально новых конструкций устройств ввода сырья: двухканального V-образного лопастного устройства ввода сырья и двухканального V-образного лопастного устройства ввода сырья с тангенциальными элементами.

Для отбойных и лопастных устройств ввода сырья показана зависимость критериев устройств ввода сырья от критерия Вебера для входящего потока сырья. Показано влияние доли отгона на работу устройств ввода сырья: увеличение доли отгона сырья приводит к уменьшению высоты сепарационной зоны и снижению гидравлического сопротивления. В результате CFD-анализа определены коэффициенты местных сопротивлений для всех рассмотренных устройств ввода сырья. Для лопастных устройств ввода сырья показано влияние конструктивных параметров (ширины и угла поворота лопастей, расстояния между лопастями) на критерии их работы.

В результате сравнительного анализа устройств ввода сырья выданы рекомендации по их применению в зависимости от скорости подачи сырья (критерия Вебера).

3.1 Расчетное исследование влияния работы устройств ввода сырья на энергозатраты процесса ректификации

В литературном обзоре был приведен ряд работ, в которых указано о значительном влиянии работы устройств ввода сырья на технологические показатели работы ректификационных колонн [29-32]. Реконструкция устройств ввода сырья приводила к положительному экономическому эффекту. Однако, этой тематике посвящено малое количество работ, в связи с чем было проведено математическое моделирование работы ректификационной колонны с целью установить влияние работы устройств ввода сырья на работу колонны в целом. Моделирование процесса ректификации проводилось с применением программного пакета Unisim Design. Моделирование проведено для различных сред, а также для колонн с различным количеством контактных устройств.

На первом этапе в качестве модельного сырья применялась смесь легких углеводородов $C_1 - C_4$, подробный состав которой приведен в Таблице 3.1. Расход сырья принят 5575 кг/ч. В результате разделения приняты продукты: изобутан-бутановая фракция, требования к которой определяются содержанием пропана не более 2%, и пропановая фракция, в которой допускается содержание бутанов не более 2%. В ходе моделирования ставилась задача изучения влияния доли уноса жидкости при подаче парожидкостного сырья в зону питания на энергозатраты колонны, при постоянном материальном балансе колонны в целом. Подвод тепла с сырьем колонны и отводы тепла с продуктами разделения также оставались неизменными.

Таблица 3.1 – Состав модельного сырья

Компонент	Содержание, % мол.
Метан CH_4	24,70
Этан C_2H_6	26,18
Пропан C_3H_8	25,60
Изобутан C_4H_{10}	12,03
н-бутан C_4H_{10}	11,49

Схема колонны, примененная для построения математической модели, представлена на Рисунке 3.1. Сырье (поток 11-1) поступает в оператор сепарации V-102, который моделирует полное разделение поступающего потока сырья на пар (12-0) и жидкость (13-0). Поток жидкости (13-0) поступает в ветвитель TEE-101, в котором задается соотношение потоков жидкости, уходящей в верхнюю часть (каплеунос, 13n) и нижнюю часть (13-00). Поток унесенной жидкости (13n) и газа (12-0) смешиваются в смесителе MIX-102, и объединенный поток направляется в колонну T-101, моделирующую укрепляющую секцию ректификационной колонны. Поток жидкости (13-00) подается в колонну T-102, моделирующую отгонную секцию ректификационной колонны. Дистиллят колонны T-101 представляет собой дистиллят моделируемой ректификационной колонны, пропановую фракцию. Кубовый продукт колонны T-102 представляет собой кубовый продукт моделируемой ректификационной колонны, изобутан-бутановую фракцию. Дистиллят колонны T-102 и кубовый продукт колонны T-101 при помощи оператора рецикла направляются в зону ввода сырья.

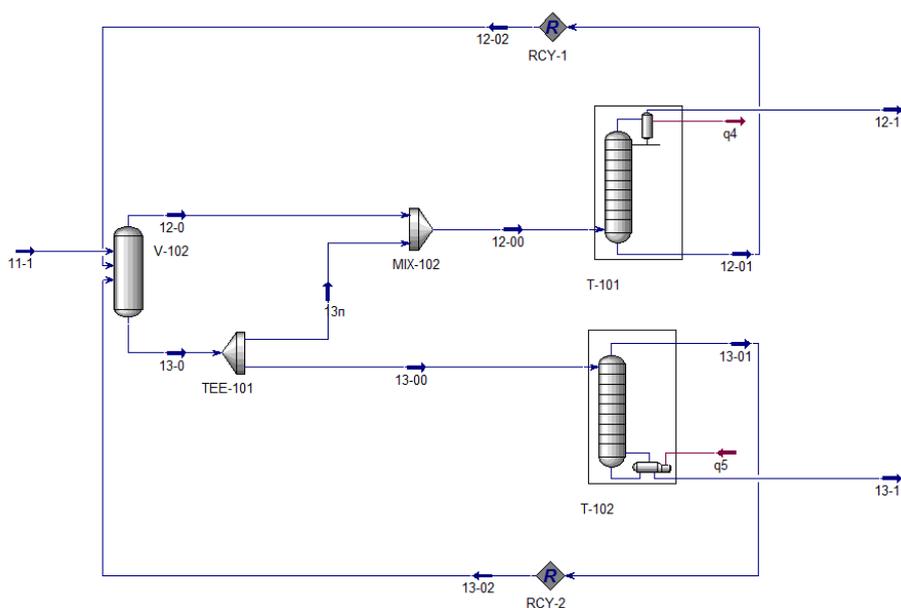


Рисунок 3.1 – Модель колонны для определения влияния эффективности зоны питания

Результаты моделирования представлены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты моделирования колонны с различной эффективностью разделения в зоне питания

Доля уноса жидкости	0%		1%		5%		10%		15%		20%		25%		30%	
	Пар	Жидк.														
Температура, °С	3,9	84,2	3,9	84,2	3,9	84,2	3,9	84,2	3,9	84,2	3,9	84,2	3,9	84,2	3,9	84,2
Давление, бар	13,00	13,14	13,00	13,14	13,00	13,14	13,00	13,14	13,00	13,14	13,00	13,14	13,00	13,14	13,00	13,14
Масс. расход, кг/ч	3619	1956	3619	1956	3619	1956	3619	1956	3619	1956	3619	1956	3619	1956	3619	1956
Состав, % мол.																
Метан	31,84	0,00	31,84	0,00	31,84	0,00	31,84	0,00	31,84	0,00	31,84	0,00	31,84	0,00	31,84	0,00
Этан	33,75	0,00	33,75	0,00	33,75	0,00	33,75	0,00	33,75	0,00	33,75	0,00	33,75	0,00	33,75	0,00
Пропан	32,41	2,00	32,41	2,00	32,41	2,00	32,41	2,00	32,41	2,00	32,41	2,00	32,41	2,00	32,41	2,00
Изобутан	1,79	47,47	1,79	47,47	1,79	47,47	1,79	47,47	1,79	47,47	1,79	47,47	1,79	47,47	1,79	47,47
Бутан	0,21	50,53	0,21	50,53	0,21	50,53	0,21	50,53	0,21	50,53	0,21	50,53	0,21	50,53	0,21	50,53
Подвод тепла, Мкал/ч	885,4		887,7		897		908,5		920,1		931,6		943,3		955,1	
Отвод тепла, Мкал/ч	466,1		468,4		477,6		489,1		500,7		512,3		523,9		535,7	
Суммарные энергозатраты, Мкал/ч	1351,5		1356,1		1374,6		1397,6		1420,8		1443,9		1467,2		1490,8	

По данным Таблицы 3.2 следует, что снижение доли уноса жидкости в зоне питания приводит к увеличению энергозатрат. При увеличении доли уноса жидкости в узле ввода сырья на 5% теплоподвод увеличивается на 1,31%, теплоотвод уменьшается на 2,47%. При увеличении доли уноса жидкости в узле ввода сырья на 10% теплоподвод увеличивается на 2,61%, теплоотвод уменьшается на 4,93%. При увеличении доли уноса жидкости в узле ввода сырья на 30% теплоподвод увеличивается на 7,90%, теплоотвод уменьшается на 14,90% [111]. Таким образом, доля уноса жидкости в устройстве ввода сырья в ректификационную колонну оказывает влияние на энергозатраты процесса ректификации. Отмечено, что увеличение доли уноса жидкости в зоне питания в среднем на каждый 1% приводит к необходимости увеличивать теплоподвод на 0,26% и повышать теплосъем на 0,50%.

Влияние полноты разделения парожидкостного сырья на эффективность работы колонны рассмотрена дополнительно на примерах колонн деэтанзации установки пиролиза и деизопентанизации установки изомеризации бензиновых фракций. Данные колонны имеют существенные отличия по составу смеси, по количеству и типу внутренних контактных устройств, по технологическим параметрам проведения процесса.

В колонне деизопентанизации происходит разделение стабильной реакционной смеси процесса изомеризации бензиновых фракций с выделением изопентановой фракции, являющейся высокооктановым компонентом товарных бензинов, имеющей низкое содержание ограниченных стандартом ТР ТС 013/2011 олефинов и ароматических соединений, и обладающей хорошими пусковыми свойствами [112]. Ранее в работе [113] прорабатывался вопрос о снижении энергозатрат на фракционирование с применением перекрестноточных насадочных контактных устройств в количестве 60, 70 и 80 шт.

Сырьем колонны является фракция, преимущественно состоящая из предельных углеводородов C_5 - C_6 нормального и разветвленного строения, состав которой приведен в Таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Состав сырья колонны деизопентанизации

Компонент	Содержание, % масс.
Бутаны	0,08
Изопентан	40,98
н-пентан	44,07
Циклопентан	2,11
н-гексан	3,35
Изогексаны	7,71
Циклогексан	1,00
Гептаны	0,70

Давление колонны составляет 2,10 атм., т.е. разделение происходит при небольшом давлении. Расход сырья 10000 кг/ч. Целью разделения являлось получение изопентановой фракции в количестве 4200 кг/ч, с содержанием изопентана 97,5% масс. Расчет приведен на варианты с 60, 70 и 80 реальными тарелками при КПД 0,6. Результаты расчета приведены в Таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты моделирования деизопентанизатора

Доля уноса жидкости, %	Теплоподвод, Гкал/ч			Теплоотвод, Гкал/ч		
	60 тар.	70 тар.	80 тар.	60 тар.	70 тар.	80 тар.
0	7,092	4,677	3,783	7,481	5,066	4,172
1	7,099	4,679	3,784	7,488	5,069	4,173
5	7,128	4,688	3,788	7,518	5,078	4,178
10	7,166	4,700	3,794	7,556	5,089	4,183
15	7,205	4,711	3,799	7,595	5,101	4,188
20	7,245	4,723	3,804	7,635	5,113	4,194
25	7,285	4,735	3,810	7,675	5,125	4,199
30	7,236	4,747	3,813	7,716	5,137	4,202

Как видно из Таблицы 3.4, увеличение доли уноса жидкости в зоне питания приводит к увеличению энергозатрат. При увеличении доли уноса жидкости в узле ввода сырья на 10% увеличение теплоподвода в колонну с 60 тарелками составило 1,04%, увеличение теплоотвода из колонны 1,00%, с 70 тарелками составило 0,49%, увеличение теплоотвода из колонны 0,45%, с 80 тарелками составило 0,29%, увеличение теплоотвода из колонны 0,26%. Можно отметить, что влияние доли уноса жидкости в зоне питания колонны снижается при увеличении числа тарелок.

В колонне деэтанализации установки пиролиза происходит выделение этан-этиленовой фракции из очищенного от метановодородной фракции пирогаза. Пирогаз представляет собой смесь алкановых и алкеновых углеводородов C_2-C_4 , разделение в колонне происходит под высоким давлением 29,0 атм. и с температурой верха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это обуславливает высокую стоимость затрат на отвод тепла колонны [114]. Сырьем колонны является пирогаз, предварительно очищенный от метана и водорода, состав которого приведен в Таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Состав сырья колонны деэтанализации

Компонент	Содержание, % масс.
Метан	0,12
Этан	13,69
Этилен	57,24
Ацетилен	0,42
Пропан	2,99
Пропилен	12,54
Метилацетилен	0,82
C_{4+}	12,20

Давление колонны составляет 29,0 атм, т.е. разделение происходит при повышенном давлении. Расход сырья 18840 кг/ч. Целью разделения являлось получение этан-этиленовой фракции в количестве 13510 кг/ч, с содержанием суммы этана и этилена 98,6% масс. Колонна оснащается 41 реальной тарелкой с КПД 0,7. Результаты расчета приведены в Таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты моделирования деэтанализатора

Доля уноса жидкости, %	Теплоподвод, Мкал/ч	Теплоотвод, Мкал/ч
0	963,8	800,5
1	964,0	800,8
5	967,4	804,2
10	971,9	808,7
15	976,3	813,2
20	980,8	817,7
25	985,3	822,1
30	989,5	826,3

Как видно из Таблицы 3.6, увеличение доли уноса жидкости в зоне питания приводит к увеличению энергозатрат. При увеличении доли уноса жидкости в узле ввода сырья на 5% теплоподвод увеличивается на 0,37%, теплоотвод увеличился на 0,46%. При увеличении доли уноса жидкости в узле ввода сырья на 10% теплоподвод увеличивается на 0,84%, теплоотвод увеличивается на 1,02%. При увеличении доли уноса жидкости в узле ввода сырья на 30% теплоподвод увеличивается на 2,67%, теплоотвод увеличивается на 3,23%.

Результаты исследования приведены в сводной Таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Сводные результаты моделирования колонн

Описание колонны	Увеличение энергозатрат, %, при увеличении доли уноса жидкости в зоне ввода сырья на:		
	1%	5%	10%
Модельная смесь C ₁ -C ₄ , 15 т. тар.	0,34	1,71	3,41
Дезтанизатор, 41 р. тар.	0,05	0,24	0,47
Деизопентанизатор, 60 р. тар.	0,10	0,50	1,02
Деизопентанизатор, 70 р. тар.	0,03	0,41	0,90
Деизопентанизатор, 80 р. тар.	0,03	0,14	0,28

По результатам моделирования видно, что конструктивное оформление узла ввода сырья в ректификационную колонну имеет влияние на энергозатраты процесса разделения, при различных условиях процесса ректификации. При уносе 1% жидкости в зоне ввода сырья увеличение энергозатрат на разделение составляет 0,03 – 0,34%, при уносе 5% жидкости в зоне ввода сырья увеличение энергозатрат на разделение составляет 0,14 – 1,71%, при уносе 10% жидкости в зоне ввода сырья увеличение энергозатрат на разделение составляет 0,28 – 3,41%. Отмечено, что чем меньше контактных устройств содержит колонна, тем большее влияние на энергозатраты процесса ректификации оказывает эффективность работы устройства ввода сырья [115].

Доля уноса жидкости в зоне ввода сырья повышает энергозатраты на проведение процесса ректификации. Увеличение эффективности работы устройств ввода сырья приводит к снижению энергозатрат процесса разделения смесей.

Таким образом, исследования гидродинамики, влияния различных параметров устройств ввода сырья на эффективность его работы является актуальной задачей.

3.2 CFD-анализ устройств ввода сырья различной конструкции

3.2.1 Отбойные устройства ввода сырья

В данном разделе приведены результаты CFD-анализа наиболее простых устройств ввода сырья – отбойных, приведенных на Рисунке 3.2, а также их сравнение с работой колонны без специальных устройств ввода. Данные устройства состоят из расположенных напротив штуцера перегородки, целью которой является разделение потока сырья на 2 части и изменение их направления вдоль корпуса колонны. Поворот потока приводит к уменьшению кинетической составляющей потока. Тангенциальное движение вдоль корпуса колонны позволяет увеличить глубину разделения парожидкостной смеси на пар и жидкость, за счет действия возникающих центробежных сил.

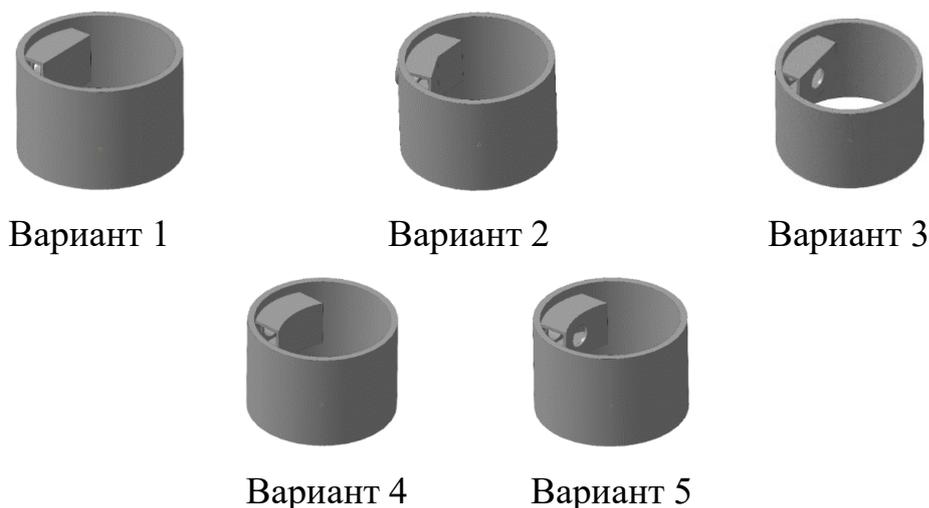


Рисунок 3.2 – 3D-модели устройств ввода сырья для проведения расчетного исследования гидродинамики

В варианте 1 отбойная стенка является плоской, поток сырья направлен перпендикулярно плоскости стенки. В варианте 2 отбойник имеет две

направляющие стенки, вдоль которых направляются два разделенных потока. В варианте 3 отбойная стенка является плоской, как в варианте 1, однако, в ней имеется отверстие для прохода части потока сырья и снижения гидравлического сопротивления устройства. В варианте 4 стенка отбойника имеет вогнутую форму, вдоль стенки направляются потоки сырья. В варианте 5 в вогнутой стенке отбойника предусмотрено отверстие. Исследуемые устройства ввода описаны в работах [11,16,24,25].

Геометрические параметры модели устройства ввода сырья следующие: диаметр штуцера ввода сырья равен 500 мм, высота отбойных элементов и лопастного устройства ввода сырья равна 800 мм. Таким образом, принято, что минимальная высота сепарационной зоны составляет 400 мм (даже если разделение парожидкостного потока происходит на меньшей высоте, расположить контактные устройства на уровне отбойного устройства невозможно). Внутренний диаметр корпуса колонны принят 2000 мм.

Расчетные исследования проводилось при помощи программного пакета ANSYS CFX, расчет проводился согласно модели турбулентности потока k-ε. Расчетная сетка тетраэдрической формы, размер элемента сетки 10 мм, размер элемента сетки возле стенок узла ввода сырья уменьшается до 1 мм, что необходимо для правильного и адекватного расчета гидродинамических явлений в пограничном слое. Количество элементов сетки на модель составляет 5 миллионов. Общий вид расчетной сетки (разрез колонны в области устройства ввода сырья по варианту 1) приведен на Рисунке 3.3.

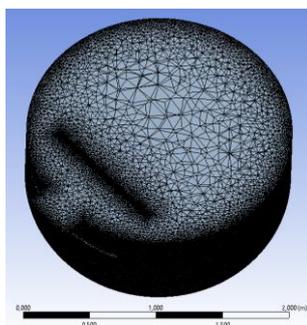


Рисунок 3.3 – Расчетная сетка для отбойного устройства ввода сырья

Граничные условия расчета: перепад давления на выходе из элемента колонны (верх и низ) равен 0 Па, на входе в колонну задается средняя скорость входящего потока. В результате CFD-анализа рассчитываются скорости каждой фазы по объему колонны, концентрации фаз, распределение давления в объеме колонны, в частности, рассчитывается давление во входном штуцере для определения гидравлического сопротивления устройства ввода сырья.

На первом этапе расчетных исследований был проведен CFD-анализ работы представленных на Рисунке 3.3, а также колонны без специальных устройств ввода сырья, при подачи сырьевого потока, представленного в Таблице 3.1. Технологические условия в колонне соответствуют доле отгона сырья 0,73. 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 отсутствие (менее 1% об.) жидкости;
- 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 3.4: на сечениях «а» и «б» распределение неравномерное, на разрезе видны области разных цветов, что говорит, что скорости элементарных струек потока газа отличается, на сечении «в» – равномерное, на разрезе видна одна область одинакового цвета, что говорит о том, что скорости элементарных струек потока отличаются не более чем на 0,1 м/с;
- перепад давления (гидравлическое сопротивление, Δp) устройства ввода сырья.

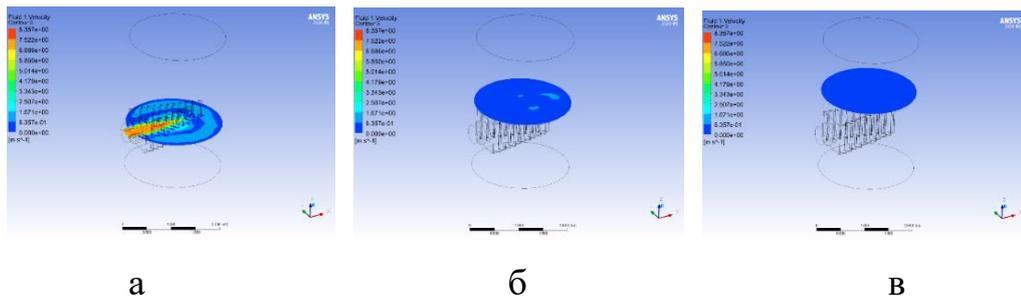


Рисунок 3.4 – Пример определения высоты зоны распределения (h_2)

В качестве показателей оценки эффективности работы устройств ввода сырья предлагается ввести следующие расчетные 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 исследуемым устройством ввода сырья.

О возможности расчета перепада давления на устройствах ректификационных колонн расчетным методом подробно рассмотрено в работах [105,116]. Неравномерность распределения парового потока снижает эффективность работы контактных устройств, что рассмотрено в работе [117].

Представлены зависимости вышеприведенных показателей и критериев от скорости подачи потока, а также от критерия Вебера, который характеризует соотношение сил инерции и поверхностного натяжения – показателя работы, требующейся на создание единицы межфазной поверхности [118]. Данный критерий в работе [119] был применен в расчетах по определению межфазной поверхности на контактных тарелках абсорбционных и ректификационных колонн. Под скоростью потока сырья принимаем среднюю скорость двухфазного потока сырья.

$$We = \frac{w^2 d \rho}{\sigma} \quad (3.1)$$

где: d – эквивалентный диаметр, м;

w – средняя скорость потока, м/с;

ρ – средняя плотность потока, кг/м³;

σ – поверхностное натяжение, Н/м.

Результаты расчетов представлены в Таблицах 3.8-3.10, а также на графиках, приведенных на Рисунках 3.5-3.7.

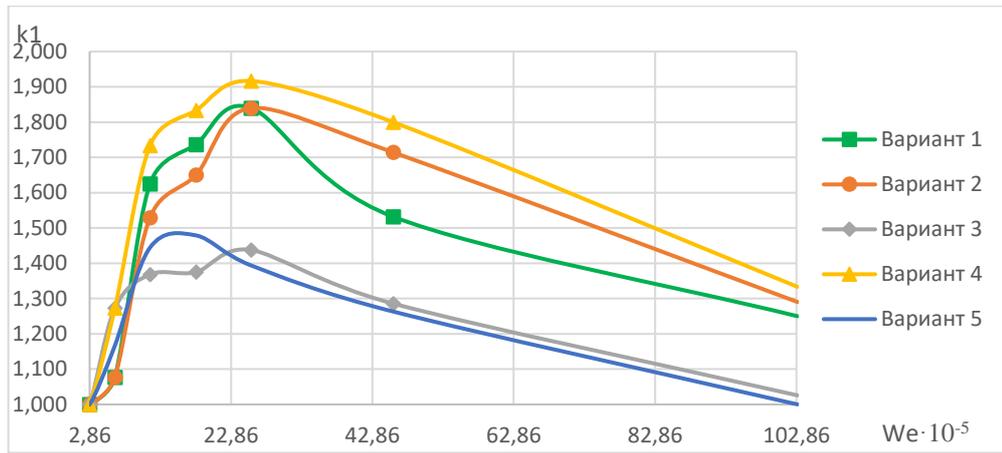


Рисунок 3.5 – Зависимость критерия высоты сепарационной зоны от критерия Вебера для потока сырья для различных устройств ввода

Таблица 3.8 – Расчетная высота сепарационной зоны моделируемых устройств ввода сырья

Скорость, м/с	Критерий Вебера, $We \cdot 10^{-5}$	Высота сепарационной зоны h_1 , мм					
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5	Без устр-в ввода
3	1,03	400	400	400	400	400	400
5	2,86	400	400	400	400	400	400
7,5	6,43	650	650	550	550	600	700
10	11,4	800	850	950	750	900	1300
12,5	17,9	950	1000	1200	900	1150	1650
15	25,7	1250	1250	1600	1200	1650	2300
20	45,8	2350	2100	2800	2000	2850	3600
30	103	3200	3100	3900	3000	4000	4000
-	-	Критерий высоты сепарационной зоны k_1					
3	1,03	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	-
5	2,86	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	-
7,5	6,43	1,077	1,077	1,273	1,273	1,167	-
10	11,4	1,625	1,529	1,368	1,733	1,444	-
12,5	17,9	1,737	1,650	1,375	1,833	1,479	-
15	25,7	1,840	1,840	1,438	1,917	1,394	-
20	45,8	1,532	1,714	1,286	1,800	1,263	-
30	103	1,250	1,290	1,026	1,333	1,000	-

По данным Таблицы 3.8 видно, что показатель высоты сепарационной зоны увеличивается с увеличением скорости подачи сырья выше 5 м/с или увеличением значения критерия Вебера выше $2,86 \cdot 10^5$, до скорости 20 м/с (критерий Вебера

$4,58 \cdot 10^6$), далее значение критерия уменьшается. Для отбойных устройств по вариантам 1, 2, 4 наблюдается рост высокого значения критерия высоты зоны сепарации при скорости подачи сырья от 7,5 до 15 м/с, значения критерия Вебера от $6,43 \cdot 10^5$ до $2,57 \cdot 10^6$, после чего значение критерия снижается. При скорости подачи сырья 15 м/с высота сепарационной зоны при отсутствии устройства ввода равна 2300 мм. Для отбойных устройств по вариантам 1, 2, 4 высота сепарационной зоны составляет 1200 – 1250 мм. Устройства по вариантам 3, 5 (с отверстием напротив штуцера ввода сырья) требуют большей высоты сепарационной зоны (1650 мм). При этой скорости наблюдается максимальное значение критерия высоты сепарационной зоны, до 1,917 в случае применения отбойного устройства по варианту 4. При увеличении скорости до 30 м/с высота сепарационной зоны увеличивается для всех видов отбойных устройств. Сохранение сепарационной эффективности отбойных устройств можно объяснить влиянием центробежной силы, возникающей при движении потока вдоль корпуса колонны, которая растет квадратично с ростом скорости потока. При дальнейшем увеличении скорости потока будет происходить столкновение встречных потоков в зоне напротив точки ввода сырья и нахождения отбойника, что снизит критерий высоты сепарационной зоны. Отбойник по варианту 4 наиболее эффективный, что связано с его формой, обеспечивающий плавный поворот потока на входе в устройство. Отбойники по вариантам 3, 5 имеют критерий высоты сепарационной зоны в области скоростей подачи сырья от 5 до 15 м/с, не выше 1,479. При скоростях подачи сырья от 5 до 7,5 м/с, часть потока, направленная вдоль стенок колонны, эффективно разделяется под действием центробежных сил, другая часть движется через отверстие в отбойнике, и сепарируется за время пути до противоположной стенки корпуса колонны. При более высокой скорости подачи сырья поток, проходящий через отверстие в отбойнике, не успевает отсепарироваться по пути до стенки колонны, происходит удар потока об стенку колонны, вследствие чего возникает разбрызгивание и снижение показателя сепарационной зоны.

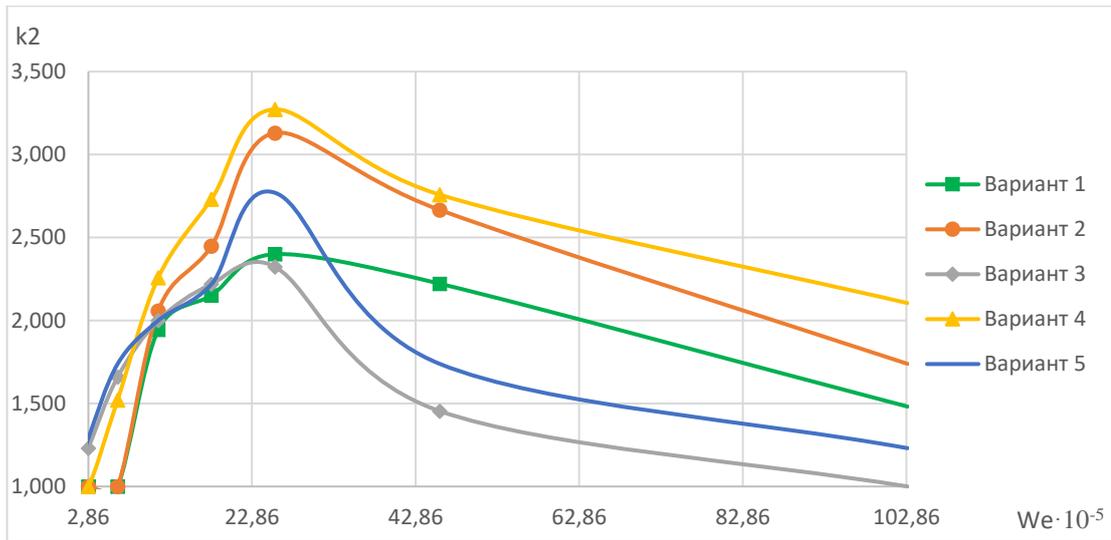


Рисунок 3.6 – Зависимость критерия высоты зоны распределения от критерия Вебера для потока сырья для различных устройств ввода

Таблица 3.9 – Расчетная высота зоны распределения моделируемых устройств ввода сырья

Скорость, м/с	Критерий Вебера, We · 10 ⁻⁵	Высота зоны распределения h ₂ , мм					
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5	Без уст-в ввода
3	1,03	4000	4000	4000	4000	4000	4000
5	2,86	4000	4000	3250	4000	3100	4000
7,5	6,43	3650	3650	2200	2400	2100	3650
10	11,4	1800	1700	1750	1550	1750	3500
12,5	17,9	1650	1450	1600	1300	1600	3550
15	25,7	1500	1150	1550	1100	1300	3600
20	45,8	1800	1500	2750	1450	2300	4000
30	103	2700	2300	4000	1900	3250	4000
-	-	Критерий высоты зоны распределения k ₂					
3	1,03	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	-
5	2,86	1,000	1,000	1,231	1,000	1,290	-
7,5	6,43	1,000	1,000	1,659	1,521	1,738	-
10	11,4	1,944	2,059	2,000	2,258	2,000	-
12,5	17,9	2,152	2,448	2,219	2,731	2,219	-
15	25,7	2,400	3,130	2,323	3,273	2,769	-
20	45,8	2,222	2,667	1,455	2,759	1,739	-
30	103	1,481	1,739	1,000	2,105	1,231	-

Как видно из Таблицы 3.9, критерий высоты зоны распределения увеличивается при увеличении скорости подачи сырья до 15 м/с, что соответствует

значению критерия Вебера до $2,57 \cdot 10^6$. Чем выше скорость потока, тем выше степень турбулизации в том числе восходящего потока пара, что обеспечивает лучшее распределение скоростей пара по сечению аппарата, выравнивание скоростей пара на меньшей высоте колонны. Однако при дальнейшем увеличении скорости подачи сырья критерий высоты зоны распределения уменьшается. Наиболее эффективны с этой точки зрения отбойники, при скорости подачи сырья 15 м/с (максимальное значение) с вогнутой формой, по вариантам 2, 4 и 5, причем отбойники без отверстия на 11 – 16% эффективнее (выше показатель высоты зоны распределения). Отбойники с плоской стенкой имеют наименьший показатель высоты зоны распределения при скорости подачи сырья от 10 м/с. Минимально достигнутая высота зоны распределения составила 1100 мм для отбойного устройства по варианту 4 при скорости 15 м/с (значение критерия Вебера $2,57 \cdot 10^6$).

Таблица 3.10 – Расчетное гидравлическое сопротивление моделируемых устройств ввода сырья

Скорость, м/с	Критерий Вебера, $We \cdot 10^{-5}$	Гидравлическое сопротивление Δp , Па				
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
3	1,03	900	734	770	706	689
5	2,86	2478	1902	2133	2083	1797
7,5	6,43	5435	4470	4531	4409	4120
10	11,4	9610	7474	8924	7731	7364
12,5	17,9	14774	12076	13183	11778	11872
15	25,7	21420	17662	18365	17216	17294
20	45,8	38017	31616	33795	30852	30823
30	103	86641	70598	77872	70891	69714

Характер зависимостей сопротивления от скорости соответствует закону Дарси — Вейсбаха. Гидравлическое сопротивление устройств по вариантам 2, 3, 4, 5 меньше, чем у отбойника по варианту 1 (на 16-24%), что связано с отсутствием удара потока о стенку отбойника перпендикулярно. В устройствах по вариантам 2, 4 обеспечивается разделение и поворот потока с направлением потоков вдоль стенки корпуса колонны, в устройствах по вариантам 3, 5 напротив штуцера ввода

сырья предусмотрено отверстие, через которое проходит часть подаваемого в колонну потока сырья. Эти факторы снижают гидравлическое сопротивление устройства.

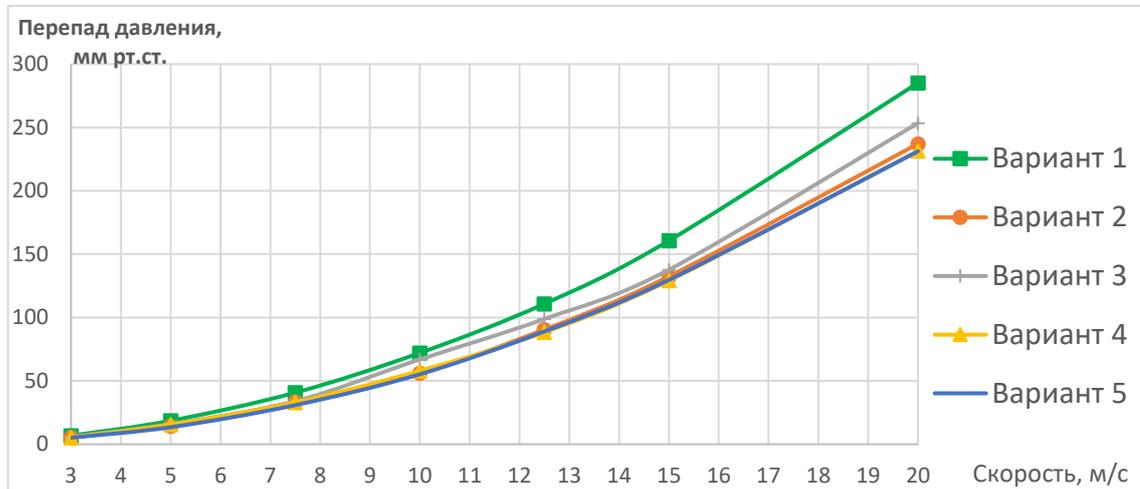


Рисунок 3.7 – Зависимость гидравлического сопротивления от скорости подачи сырья для различных устройств ввода сырья

Таким образом, наибольшим гидравлическим сопротивлением обладает устройство по варианту 1. Устройства ввода по вариантам 2, 4 имеют меньшее гидравлическое сопротивление. Самый низкий перепад давления наблюдается в устройствах ввода по вариантам 3, 5.

Визуализация распределения дисперсной фазы при различных скоростях ввода сырья в колонну при отсутствии устройства ввода показано на Рисунке 3.8.

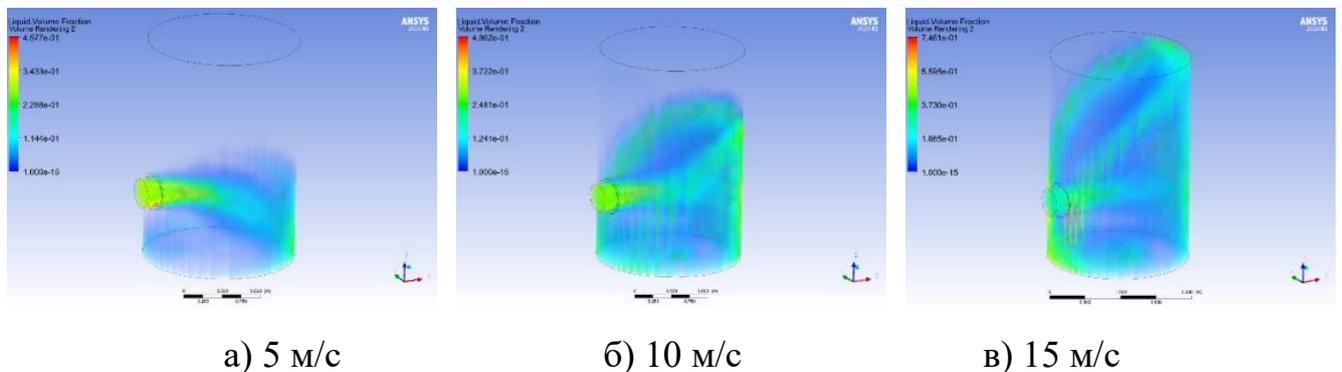


Рисунок 3.8 – Распределение дисперсной фазы при различных скоростях ввода двухфазного сырья в колонну при отсутствии устройства ввода

Из Рисунка 3.8 можно увидеть, что при повышении скорости выше 5 м/с поток достигает противоположной стенки корпуса колонны, ударяется в него, вследствие чего возникает явление разбрызгивания и витания частиц жидкой фазы. Наблюдается турбулизация потоков и образование вихрей, соизмеримых с размером колонны. Высота сепарационной зоны значительно увеличивается при увеличении скорости подачи сырья: на Рисунке 3.8 видно, что высота подъема жидкой фазы при скорости подачи сырья 15 м/с значительно выше (на 700 мм), чем при скорости подачи сырья 10 м/с.

По результатам данных расчетов, можно сделать вывод о том, что при скорости подачи сырья менее 5 м/с с высоким содержанием паровой фазы применение устройств ввода сырья не требуется, так как для сепарации потока требуется минимальная высота сепарационного пространства, критерий высоты сепарационной зоны для них равен 1. Для больших скоростей подачи сырья рекомендуется устанавливать устройство ввода сырья. Визуализация распределения дисперсной фазы при различных скоростях ввода двухфазного сырья в колонну при отсутствии устройства ввода показано на Рисунке 3.9.

Показано, что отбойные устройства способны уменьшать высоту сепарационной зоны в диапазоне скоростей ввода сырья от 5 до 30 м/с. Это связано с разделением сырьевого потока на две части и направлением этих потоков вдоль стенки колонны, возникающая центробежная сила повышает эффективность сепарации, снижает унос капель вместе с паровой фазой. Нецелесообразно применять отверстия в отбойниках напротив штуцера ввода сырья, так как это уменьшает расход потоков, направляемых вдоль стенки колонны, а поток, проходящий прямо через отверстие, ударяется об стенку колонны напротив, и возникает эффект разбрызгивания (варианты 3, 5), вследствие чего высота зоны сепарации у них высокая, критерий высоты зоны сепарации низкий.

При увеличении скорости подачи сырья улучшается распределение парового потока. Это связано с высокой турбулизацией потока, при которой за счет продольных и поперечных перемешиваний наблюдается выравнивание скоростей по сечению аппарата [120].

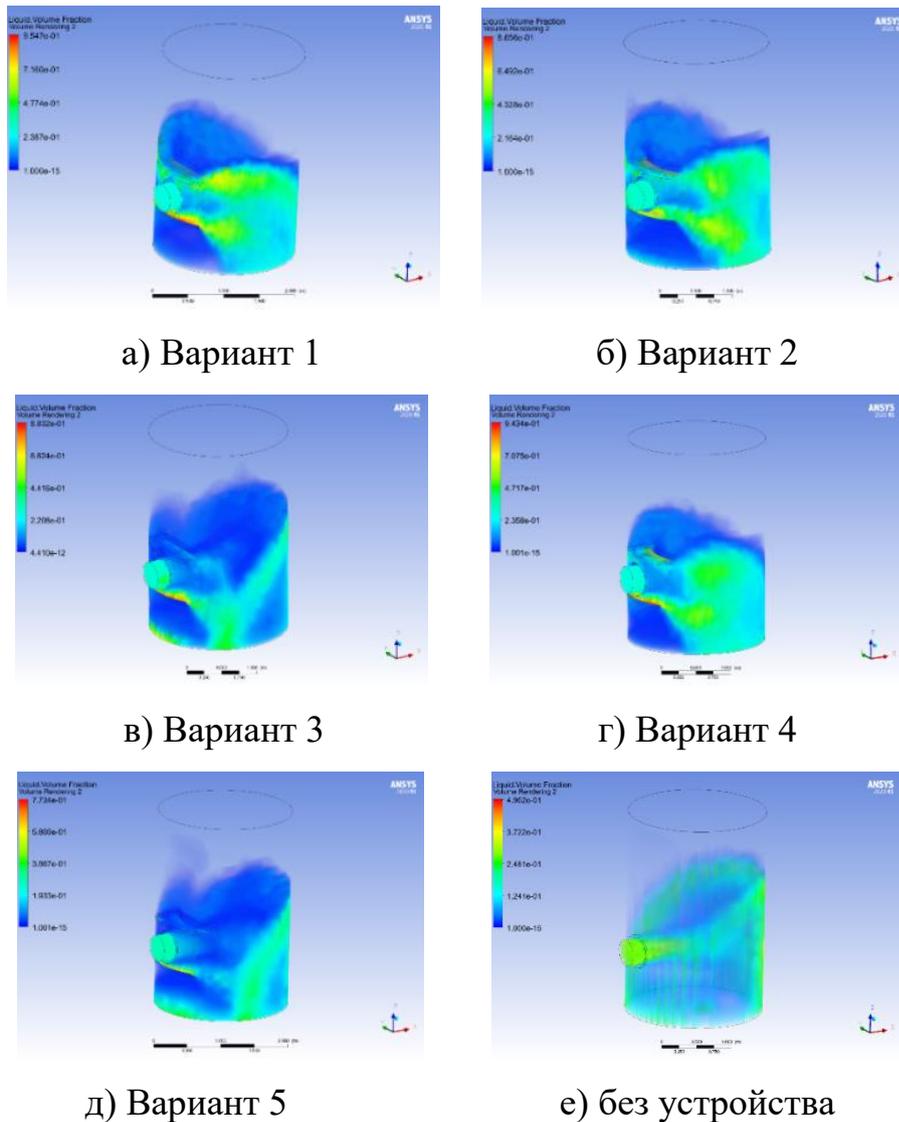
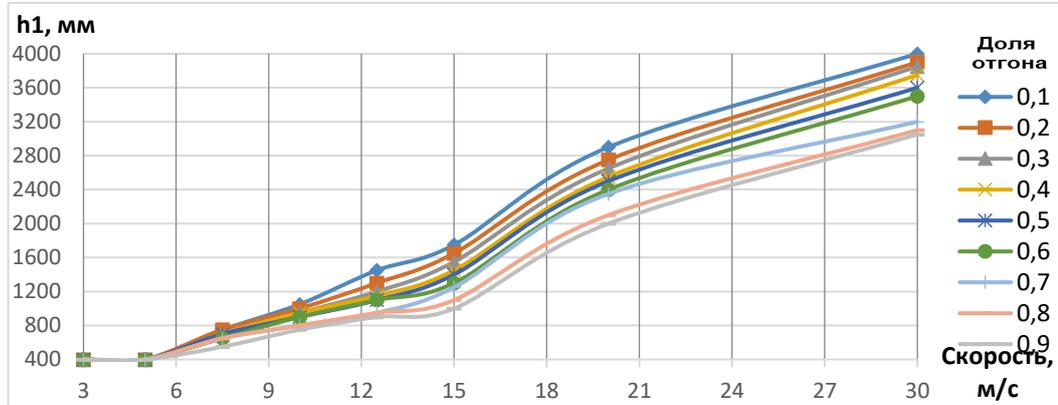


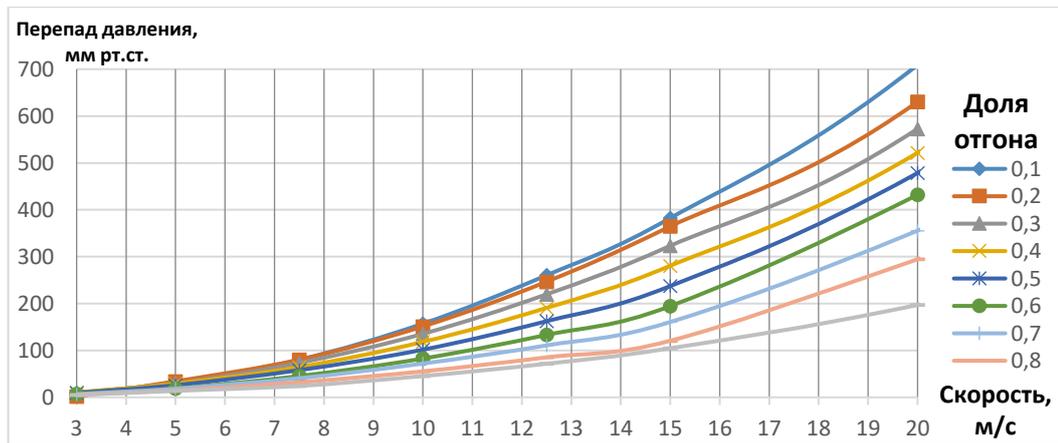
Рисунок 3.9 – Распределение дисперсной фазы в колонне при скорости сырья 10 м/с для различных вариантов отбойных устройств ввода сырья

На следующем этапе исследований выполнен расчет и анализ влияния доли отгона на показатели работы рассматриваемых устройств ввода сырья. Результаты расчета приведены на графиках на Рисунках 3.10-3.14. Из результатов расчета устройства по варианту 1 можно отметить, что при увеличении доли отгона сырья уменьшается высота сепарационной зоны устройства ввода сырья. При малой доле отгона сырья в колонну подается большое количество жидкости, которое при высокой скорости ударяется об стенку корпуса отбойника, вызывая эффект разбрызгивания и попадания жидкости в верхнюю над зоной ввода область колонны. При скорости подачи сырья до 5 м/с устройство обеспечивает полное

отделение жидкой фазы от паровой на уровне штуцера ввода сырья. При увеличении значения скорости требуемая высота сепарационной зоны растет при любом значении доли отгона в диапазоне 0,1 – 0,9.



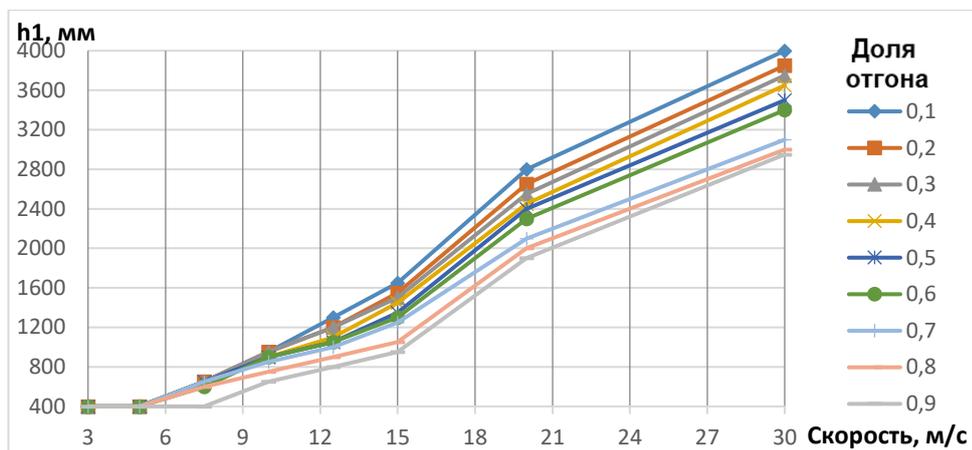
а)



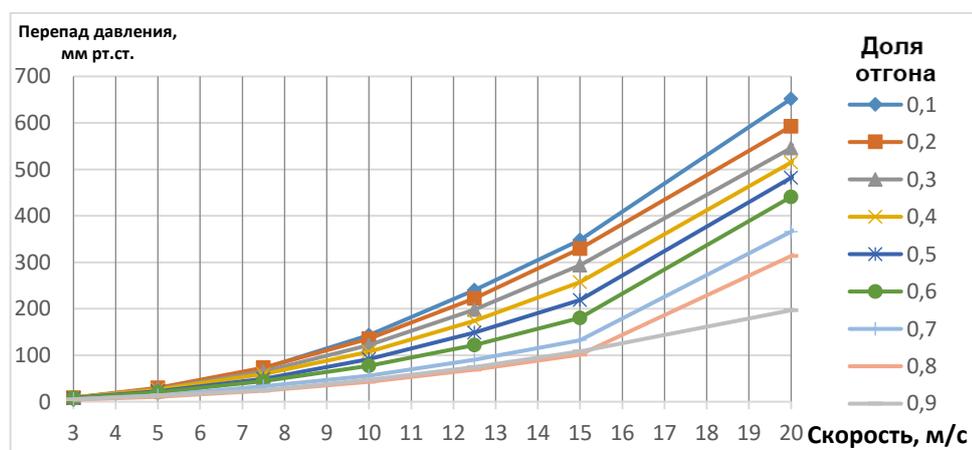
б)

Рисунок 3.10 – Зависимость высоты сепарационной зоны (а) и гидравлического сопротивления (б) устройства ввода сырья по варианту 1 от скорости и доли отгона сырья

Гидравлическое сопротивление выше при меньшей доле отгона: при уменьшении доли отгона от 0,1 до 0,9 перепад давления в устройстве снижается в 3,8 раз при скорости 15 м/с. Данная зависимость объясняется тем, что поток с меньшей долей отгона имеет более высокую среднюю плотность, что обуславливает повышенное гидравлическое сопротивление при той же скорости.



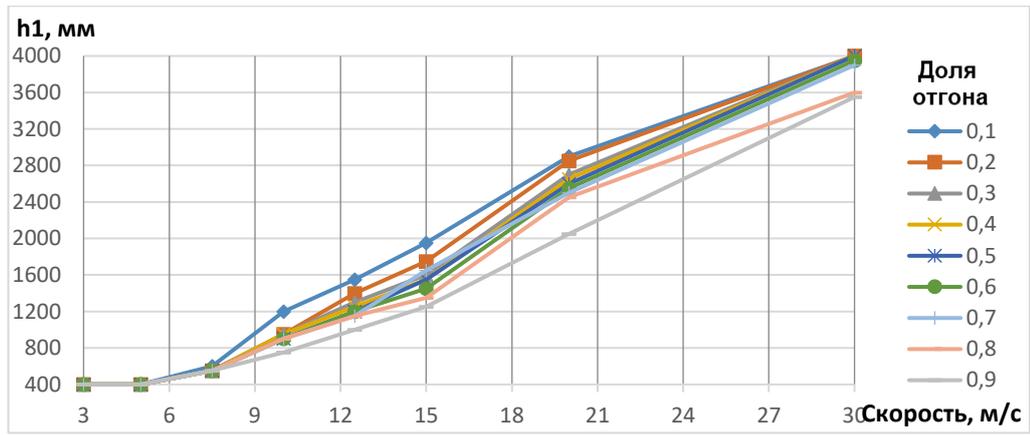
а)



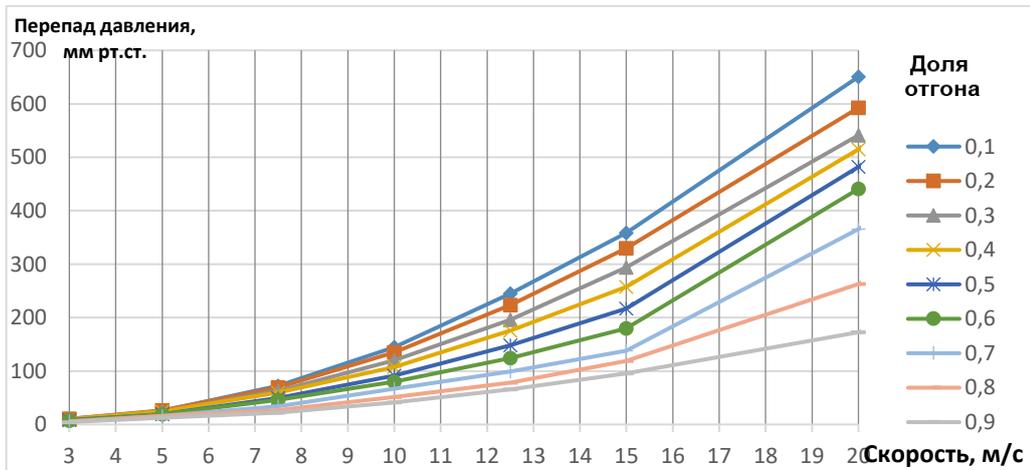
б)

Рисунок 3.11 – Зависимость высоты сепарационной зоны (а) и гидравлического сопротивления (б) устройства ввода сырья по варианту 2 от скорости и доли отгона сырья

Аналогично устройству ввода по варианту 1, в устройстве ввода по варианту 2 при увеличении доли отгона сырья уменьшается высота сепарационной зоны и гидравлическое сопротивление устройства ввода сырья. При скорости подачи сырья до 5 м/с устройство обеспечивает полное отделение жидкой фазы от паровой на уровне штуцера ввода сырья. Максимальное гидравлическое сопротивление при доле отгона 0,1 больше сопротивления при доле отгона 0,9 в 3,1 раза при скорости 20 м/с.



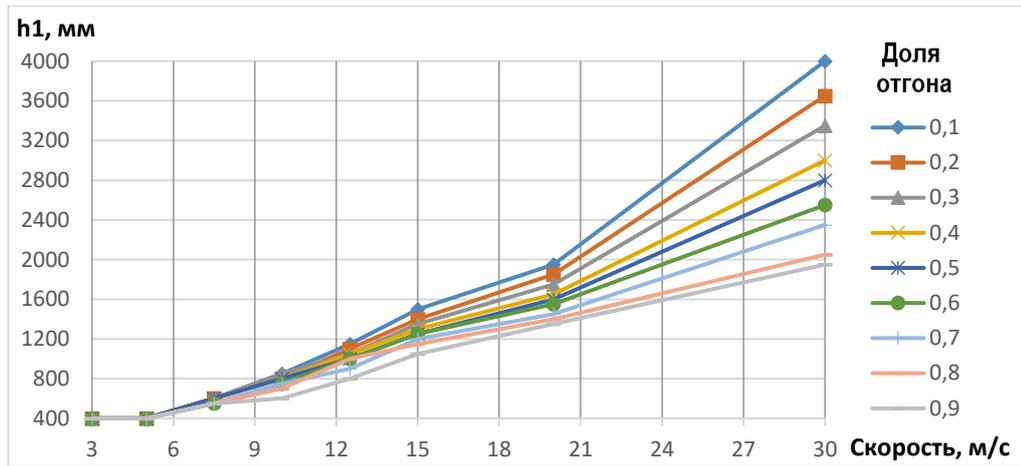
а)



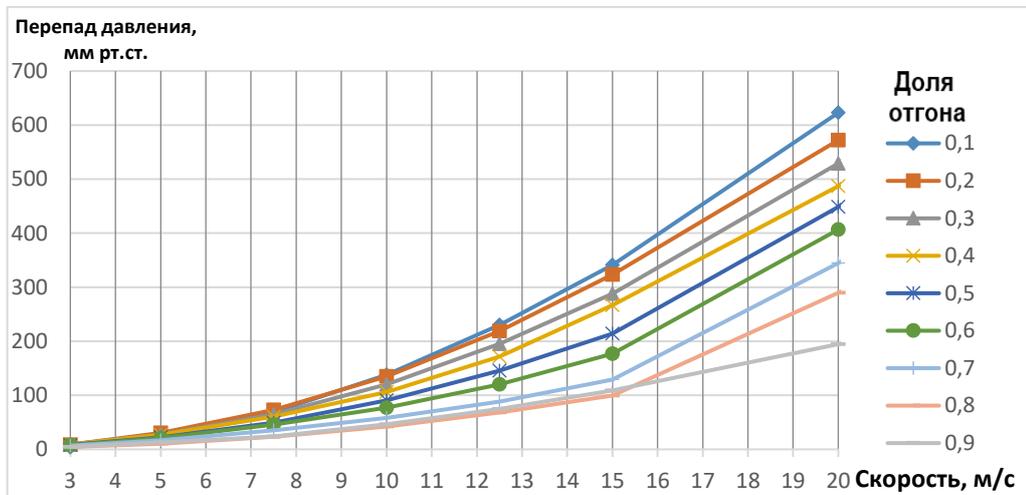
б)

Рисунок 3.12 – Зависимость высоты сепарационной зоны (а) и гидравлического сопротивления (б) устройства ввода сырья по варианту 3 от скорости и доли отгона сырья

При скорости подачи сырья до 5 м/с устройство ввода сырья по варианту 3 обеспечивает отделение жидкой фазы от паровой на уровне штуцера ввода сырья, при увеличении скорости подачи сырья до 15 м/с требуемая высота сепарационной зоны увеличивается до 1650 мм, при скорости подачи сырья 30 м/с высота сепарационной зоны превышает 4000 мм для доли отгона до 0,7. Аналогично предыдущим устройствам ввода, максимальное гидравлическое сопротивление наблюдается при доле отгона 0,1, минимальное – при доле отгона 0,9.



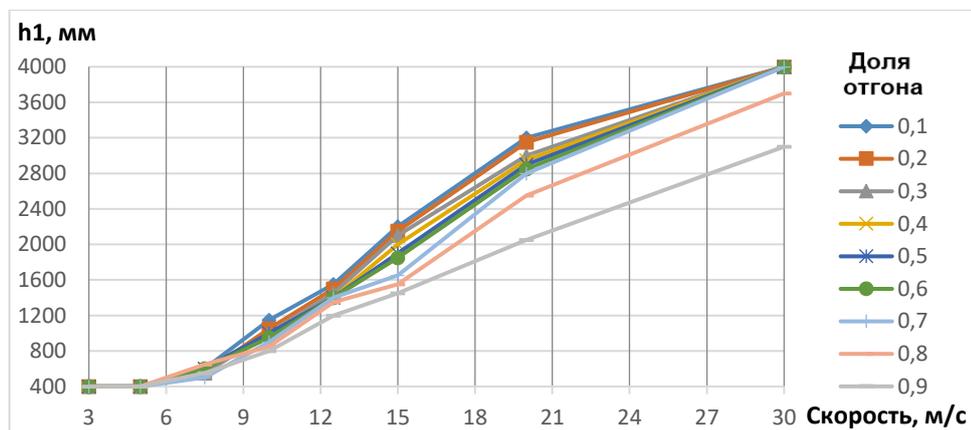
а)



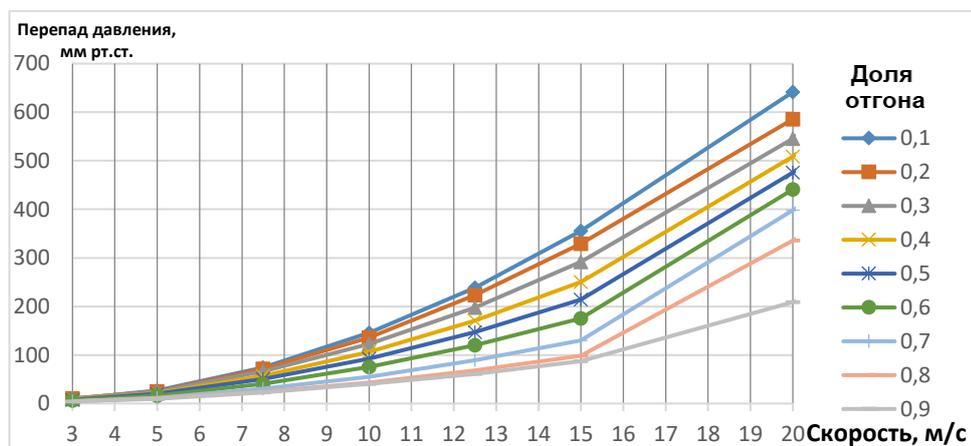
б)

Рисунок 3.13 – Зависимость высоты сепарационной зоны (а) и гидравлического сопротивления (б) устройства ввода сырья по варианту 4 от скорости и доли отгона сырья

Характер зависимостей высоты сепарационной зоны и гидравлического сопротивления от скорости и доли отгона сырья по варианту 4 не отличается от аналогичных зависимостей по варианту 2. Эффективность сепарации по варианту 4 в целом немного выше, чем по варианту 2. При скорости подачи сырья до 5 м/с устройство обеспечивает полное отделение жидкой фазы от паровой на уровне штуцера ввода сырья. Аналогично предыдущим устройствам ввода, максимальное гидравлическое сопротивление наблюдается при доле отгона 0,1, минимальное – при доле отгона 0,9.



а)



б)

Рисунок 3.14 – Зависимость высоты сепарационной зоны (а) и гидравлического сопротивления (б) от скорости и доли отгона сырьевых компонентов по варианту 5 от скорости и доли отгона сырьевых компонентов

Характер зависимостей высоты сепарационной зоны и гидравлического сопротивления от скорости и доли отгона сырьевых компонентов по варианту 5 не отличается от аналогичных зависимостей по варианту 3. Эффективность сепарации по варианту 5 в целом ниже, чем по варианту 3. При скорости подачи сырьевых компонентов до 5 м/с устройство обеспечивает полное отделение жидкой фазы от паровой на уровне штуцера ввода сырьевых компонентов, далее требуемая высота сепарационной зоны увеличивается до величины 1850 мм при скорости 15 м/с, причем вне зависимости от доли отгона сырьевых компонентов, и превышает 4000 мм при скорости подачи сырьевых компонентов 30 м/с и доли отгона до 0,6.

Результаты расчетов гидравлического сопротивления отбойных устройств ввода сырьевых компонентов, представленные на Рисунках 3.10 – 3.14, позволяют качественно

сопоставить работу данных устройств, оценивать закономерности, рассматривая численные значения параметров как оценочные. Расчетные зависимости перепада давления от скорости имеют классический, квадратичный характер.

Следует отметить, что гидродинамика двухфазных систем изучена недостаточно и не позволяет с высокой степенью точности рассчитывать гидродинамику реальных систем. Однако, для сопоставления гидродинамики различных конструкций часто применяют классические уравнения гидродинамики однофазного потока для описания двухфазных потоков по достаточно произвольным усредненным характеристикам, что, хотя и не дает объективных количественных характеристик гидродинамики объекта, но позволяет сопоставлять гидродинамику различных объектов по сопоставлению полученных числовых значений как относительных характеристик. Приведенные в данной работе расчеты и их анализ ставят своей целью рассмотрение гидродинамики устройств ввода сырья относительно друг друга.

Для рассмотренных устройств ввода сырья с отбойниками на основе уравнения гидравлического сопротивления (3.2) были рассчитаны коэффициенты местных сопротивлений. Уравнение применяется для расчета гидравлического сопротивления двухфазных систем согласно модели гомогенного течения, согласно которой система рассматривается как псевдооднородная жидкость [121].

Данное уравнение имеет вид:

$$\Delta p = \left(\lambda \frac{L}{d} + \xi_{\text{м.с.}} \right) \frac{w^2 \rho}{2} \quad (3.2)$$

где: Δp – гидравлическое сопротивление, Па;

λ – коэффициент гидравлического трения;

L/d –соотношение длины и эквивалентного диаметра объекта;

$\xi_{\text{м.с.}}$ – суммарный коэффициент местных сопротивлений;

w – скорость потока, м/с;

ρ – плотность потока, кг/м³.

Из приведенных величин только коэффициент гидравлического трения имеет зависимость от скорости потока. Например, для развитых турбулентных течений допустимо применять уравнение вида [121,122]:

$$\lambda = \frac{B}{Re^{0,25}} \quad (3.3)$$

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu} \quad (3.4)$$

где: B – эмпирический коэффициент;

Re – критерий Рейнольдса [121,122], вычисляемый по формуле:

где: d – эквивалентный диаметр, м

μ – динамическая вязкость потока, Па·с.

Таким образом, путем преобразований, можно получить вид зависимости гидравлического сопротивления от скорости потока, включающий в себя коэффициент местных сопротивлений:

$$\Delta p = \frac{K_1}{w^{-1,75}} + K_2 w^2 \quad (3.5)$$

$$\Delta p = K_1 w^{1,75} + K_2 w^2 \quad (3.6)$$

где K_1, K_2 – коэффициенты уравнения, вычисляемые по формулам:

$$K_1 = \frac{BL\mu^{0,25}\rho^{0,75}}{2d^{1,25}} \quad (3.7)$$

$$K_2 = \frac{\xi_{м.с.}\rho}{2} \quad (3.8)$$

Коэффициент K_1 показывает влияние сил трения на гидравлическое сопротивление потока, с учетом средней плотности и динамической вязкости. Коэффициент K_2 характеризует влияние на гидравлическое сопротивление особенностей конструкции устройства ввода сырья, выраженный в виде коэффициента местных сопротивлений ξ . Для определения коэффициентов K_1, K_2, ξ проведена обработка результатов CFD-анализа устройств ввода сырья методом наименьших квадратов [123], основанный на минимизации суммы квадратов разности расчетных значений и значений по уравнению 3.6. Для нашего случая минимизирующая функция выглядит следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^n \left(\Delta p_i - (K_1 w_i^{1,75} + K_2 w_i^2) \right)^2 \rightarrow \min \quad (3.9)$$

где Δp – значения перепада давления, полученное путем CFD-анализа, Па.

Задача поиска значений K_1 , K_2 , при котором значение F минимально, решалась путем решения системы уравнений:

$$\frac{dF}{dK_1} = -2 \sum_{i=1}^n \left(\Delta p_i - (K_1 w_i^{1,75} + K_2 w_i^2) \right) \cdot w_i^{1,75} = 0 \quad (3.10)$$

$$\frac{dF}{dK_2} = -2 \sum_{i=1}^n \left(\Delta p_i - (K_1 w_i^{1,75} + K_2 w_i^2) \right) \cdot w_i^2 = 0$$

В преобразованном виде:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \Delta p_i w_i^{1,75} &= K_1 \cdot \sum_{i=1}^n w_i^{3,50} + K_2 \cdot \sum_{i=1}^n w_i^{3,75} \\ \sum_{i=1}^n \Delta p_i w_i^2 &= K_1 \cdot \sum_{i=1}^n w_i^{3,75} + K_2 \cdot \sum_{i=1}^n w_i^4 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Полученная система уравнений решалась методом Крамера с применением программы MS Excel [124]. В результате обработки результатов CFD-анализа получены значения коэффициентов K_1 , K_2 , $\xi_{\text{м.с.}}$, приведенные в Таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Результаты обработки данных CFD-анализа простых устройств ввода сырья по формуле 3.6

Вариант	Скорость, м/с	Δp , Па	K_1	K_2	$\Delta p_{\text{расч}}$, Па	Погрешность, %	$\xi_{\text{м.с.}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	3	900	0,008	95,217	856,9	4,79	2,252
	5	2478			2380,3	3,94	
	7,5	5435			5355,7	1,46	
	10	9610			9521,2	0,92	
	12,5	14774			14876,9	0,70	
	15	21420			21422,8	0,02	
	20	38017			38088,3	0,18	
	30	86641			85698,4	1,09	

Продолжение Таблицы 3.11

1	2	3	4	5	6	7	8
2	3	734	0,016	77,715	699,5	4,69	1,838
	5	1902			1943,1	2,07	
	7,5	4470			4372,0	2,19	
	10	7474			7772,4	3,99	
	12,5	12076			12144,3	0,57	
	15	17662			17487,7	0,99	
	20	31616			31089,0	1,67	
	30	70598			69949,7	0,92	
3	3	770	0,031	83,267	749,2	2,83	1,969
	5	2133			2081,2	2,43	
	7,5	4531			4682,8	3,35	
	10	8924			8314,8	6,83	
	12,5	13183			13008,0	1,33	
	15	18365			18731,7	2,00	
	20	33795			33312,7	1,43	
	30	77872			74952,2	3,75	
4	3	706	0,030	76,715	690,2	1,85	1,814
	5	2083			2217,4	2,92	
	7,5	4409			4514,2	4,16	
	10	7731			7669,9	0,79	
	12,5	11778			11984,3	1,75	
	15	17216			17257,6	0,24	
	20	30852			30691,7	0,52	
	30	70891			69055,0	2,59	
5	3	689	0,029	76,000	684,2	7,07	1,797
	5	1797			1650,4	3,34	
	7,5	4120			4275,8	3,78	
	10	7364			7601,2	3,22	
	12,5	11872			11876,8	0,04	
	15	17294			17102,4	1,11	
	20	30823			30405,5	1,35	
	30	69714			68411,2	1,87	

Получены значения коэффициентов местных сопротивлений для простых отбойных устройств ввода сырья. Для устройств по вариантам 2-5, т.е. с направляющей стенкой, эти значения лежат в диапазоне 1,797 – 1,969. Для устройства по варианту 1, где происходит ударение потока об стенку отбойника перпендикулярно, значение коэффициента местного сопротивления выше и равно 2,252. Погрешность расчетов не превышает 5%, за исключением некоторых

результатов при малых скоростях потока, что, вероятно связано с низкой турбулентностью потока, в связи с чем результаты вычисления с применением формулы 3.3 могут давать некоторую ошибку.

На основании обработки данных получены значения коэффициентов K_1 , K_2 и расчетное значение гидравлического сопротивления, оценена погрешность. Коэффициент K_2 , характеризующий местные сопротивления, больше на 3-4 порядка, чем коэффициент K_1 , характеризующий возможные линейные структуры. Таким образом, можно считать, что коэффициент K_1 является не значимым. В связи с этим, проведена обработка данных согласно формуле 3.12 [122]. Результаты расчетов приведены в Таблице 3.12.

$$\Delta p = \xi \frac{w^2 \rho}{2} \quad (3.12)$$

где: ξ – суммарный коэффициент сопротивления устройства.

Таблица 3.12 – Результаты обработки данных CFD-анализа простых устройств ввода сырья по формуле 3.12

Вариант	Скорость, м/с	Δp , Па	ξ	$\Delta p_{\text{расч}}$, Па	Погрешность, %
1	2	3	4	5	6
1	3	900	2,252	856,9	4,79
	5	2478		2380,2	3,95
	7,5	5435		5355,3	1,47
	10	9610		9520,6	0,93
	12,5	14774		14876,0	0,69
	15	21420		21421,4	0,01
	20	38017		38058,8	0,11
	30	86641		85632,3	1,16
2	3	734	1,838	699,6	4,68
	5	1902		1943,4	2,07
	7,5	4470		4372,6	2,18
	10	7474		7773,6	4,01
	12,5	12076		12146,2	0,58
	15	17662		17490,5	0,97
	20	31616		31062,2	1,75
	30	70598		69890,0	1,00

Продолжение Таблицы 3.12

1	2	3	4	5	6
3	3	770	1,968	749,0	2,85
	5	2133		2080,7	2,45
	7,5	4531		4681,6	3,32
	10	8924		8322,8	6,75
	12,5	13183		13004,3	1,36
	15	18365		18726,2	1,97
	20	33795		33259,2	1,59
	30	77872		74833,2	3,90
4	3	706	1,813	690,1	2,35
	5	2083		1916,9	8,07
	7,5	4409		4313,1	2,27
	10	7731		7667,7	0,82
	12,5	11778		11980,8	1,72
	15	17216		17252,3	0,21
	20	30852		30639,7	0,69
	30	70891		68939,3	2,75
5	3	689	1,798	684,3	0,77
	5	1797		1900,8	5,68
	7,5	4120		4276,9	3,81
	10	7364		7603,4	3,25
	12,5	11872		11880,2	0,07
	15	17294		17107,5	1,08
	20	30823		30386,2	1,42
	30	69714		68369,0	1,93

Таким образом, определены критерии высоты сепарационной зоны и высоты зоны распределения, а также гидравлические сопротивления отбойных устройств ввода сырья [125]. С точки зрения достижения максимального значения критерия высоты сепарационной зоны в широком диапазоне скоростей подачи сырья и обеспечения относительно невысокого гидравлического сопротивления рекомендуется использовать отбойное устройство ввода по варианту 4.

3.2.2 Одноканальное лопастное устройство ввода сырья

В данной главе описываются результаты исследования влияния конструкции типового одноканального лопастного устройства ввода сырья на процесс

разделения парожидкостного сырья и распределения парового потока по сечению колонны. 3D-модель устройства ввода представлена на Рисунке 3.15.

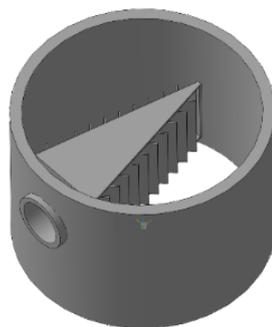


Рисунок 3.15 – 3D-модель одноканального лопастного устройства ввода сырья

Одноканальное лопастное устройство ввода сырья содержит в своей конструкции штуцер ввода сырья, соединенный с распределительным устройством с установленными в нем направляющими лопастями. Они могут быть установлены с постоянным или переменным поперечным смещением и продольным шагом.

На первом этапе расчетов исследовалась зависимости показателей от скорости подаваемого потока. Сырьем является углеводородный поток, принятый при исследовании влияния степени разделения сырья в узле ввода, которое было описано в главе 3.1.

Моделируемое одноканальное лопастное устройство ввода сырья имеет по 10 лопастей с каждой стороны, расстояние между лопастями принято 126 мм. Ширина лопасти 150 мм, угол поворота 30° .

Расчет в ANSYS CFX, как и ранее, проводился согласно модели турбулентности потока k-ε. Расчетная сетка тетраэдрической формы, размер элемента сетки 10 мм, размер элемента сетки возле стенок и лопастей узла ввода сырья уменьшается до 1 мм, что необходимо для правильного и адекватного расчета гидродинамических явлений в пограничном слое. Количество элементов сетки на модель: 6-7 миллионов, в зависимости от конструкции лопастного устройства ввода сырья (например, при увеличении количества лопастей растет количество элементов сетки). Общий вид расчетной сетки (показан разрез элемента колонны в области устройства ввода сырья) приведен на Рисунке 3.16.

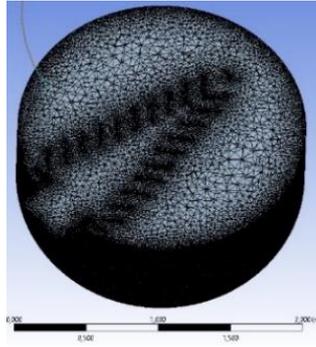


Рисунок 3.16 – Расчетная сетка для одноканального лопастного устройства ввода

Граничные условия для расчета совпадают с граничными условиями для расчета отбойных устройств ввода сырья, описанных в главе 3.2.1.

В результате моделирования гидродинамики потока в одноканальном лопастном устройстве ввода сырья получены результаты, приведенные в Таблице 3.13, на графиках на Рисунках 3.17-3.19.

Таблица 3.13 – Результаты моделирования гидродинамики одноканального лопастного устройства ввода

Скорость потока, м/с	Критерий Вебера $We \cdot 10^{-5}$	Высота сепарационной зоны h_1 , мм	Критерий высоты сепарационной зоны k_1	Высота зоны распределения h_2 , мм	Критерий высоты зоны распределения k_2	Перепад давления Δp , мм рт.ст.
5	2,86	400	1,00	4000	1,00	23,06
7,5	6,43	400	1,75	800	4,56	48,75
10	11,4	400	3,25	700	5,21	69,12
12,5	17,9	450	3,66	650	5,38	113,44
15	25,7	700	3,36	650	5,54	158,13
20	45,8	1800	2,00	1700	2,35	239,89
30	103	3200	1,25	3150	1,27	545,54

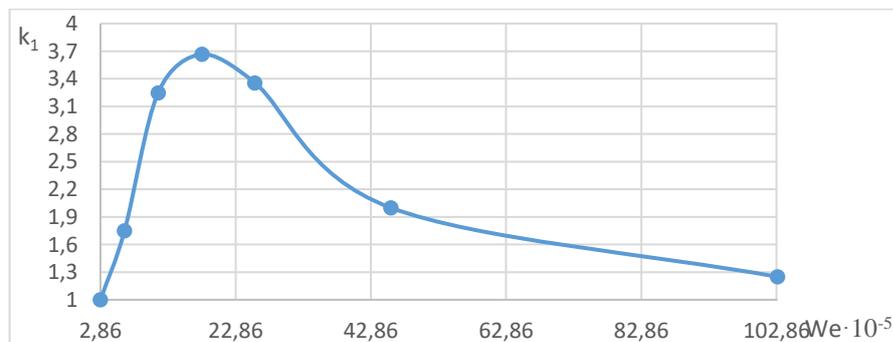


Рисунок 3.17 – Зависимость критерия высоты зоны сепарации от критерия Вебера для сырьевого потока

По результатам расчетов можно отметить, что моделируемое лопастное устройство ввода сырья обеспечивает полное отделение жидкой фазы от паровой при скорости подачи сырья 10 м/с, и меньше, чему соответствует значение критерия Вебера $1,14 \cdot 10^6$, и меньше (Рисунок 3.17). В связи с этим наблюдается резкий рост показателя высоты сепарационной зоны. При скоростях подачи сырья 10 – 15 м/с (значение критерия Вебера $1,14 \cdot 10^6$ – $2,57 \cdot 10^6$) показатель высоты сепарационной зоны остается неизменным, т.е. уменьшение высоты сепарационной зоны остается неизменным. Что говорит о сохранении высокой эффективности лопастного устройства в данном диапазоне скоростей подачи сырья. При дальнейшем увеличении скорости подачи сырья наблюдается уменьшение высоты сепарационной зоны.

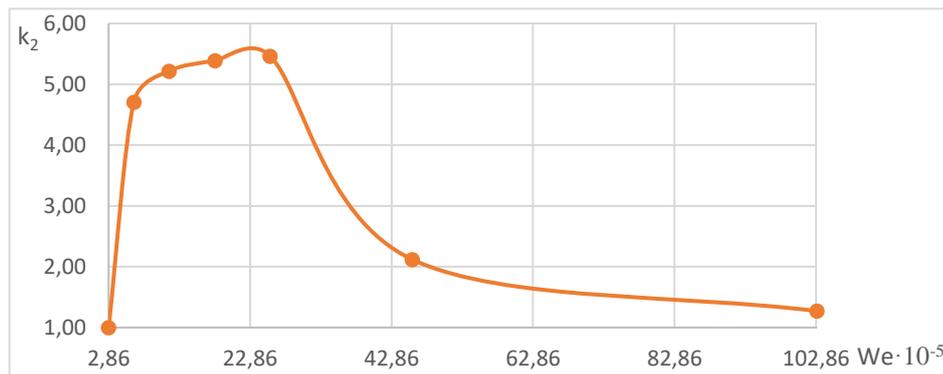
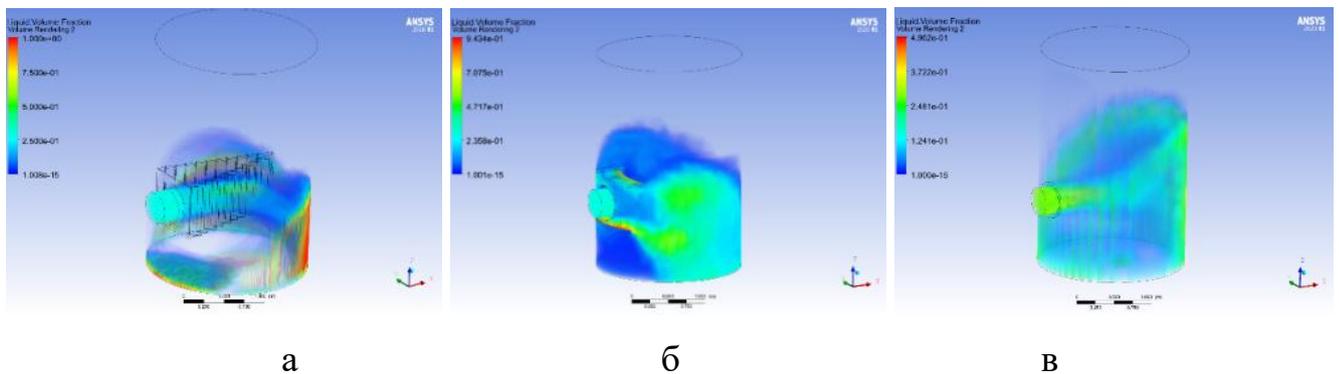


Рисунок 3.18 – Зависимость критерия распределения паровой фазы от критерия Вебера для сырьевого потока

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 уменьшении скорости ниже 7,5 или увеличении выше 15 м/с снижает этот показатель до 1,0-2,5. При малой скорости подачи сырья распределение газа по сечению колонны неравномерно ввиду низкой турбулентности потока. При слишком высокой скорости подачи сырья элементарные струи потока имеют слишком высокую скорость, что препятствует равномерному перемешиванию. Увеличение равномерности распределения

Как видно из Рисунка 3.20, поток сырья, попадая в лопастное устройство ввода сырья, с помощью направляющих лопастей направляется в две стороны, разделяясь на множество более малых потоков. В результате этого снижается их скорость, кинетическая энергия, и улучшается сепарация жидкой фазы от паровой. При скорости подачи сырья 5 м/с наблюдается полная сепарация жидкой фазы от паровой, вся жидкость концентрируется в нижней части колонны. При скорости 10 м/с также наблюдается полная сепарация жидкой фазы, вдоль корпуса колонны жидкость растекается пленкой. Это может способствовать дополнительному массообмену в реальном колонном аппарате, когда пленка жидкости взаимодействует с восходящими парами из отгонной секции колонны. При скорости 15 м/с наблюдаются удар направленных потоков об стенку корпуса колонны и явление разбрызгивания на небольшую высоту (300 мм) капель жидкости. Размер пленки жидкости больше, чем в случае скорости подачи сырья 10 м/с. В целом, в диапазоне скоростей подачи сырья 5 – 15 м/с лопастное устройство подачи сырья позволяет снизить капельный унос жидкости, по сравнению с колонной без устройства ввода сырья.

На Рисунке 3.21 приведено сравнение лопастного устройства ввода сырья с наиболее эффективным отбойным устройством (вариант 4) и аппаратом без устройства ввода сырья на скорости подачи сырья 10 м/с.



а) лопастное устройство, б) отбойное устройство, в) без устройства

Рисунок 3.21 – Распределение потока жидкости в разных устройствах ввода сырья, при скорости подачи сырья 10 м/с

Из Рисунка 3.21 видно, что при отсутствии устройства ввода (в) поток жидкости под напором ударяется об стенку корпуса напротив устройства ввода сырья, и происходит эффект разбрызгивания жидкости, заброс жидкости в область над устройством ввода сырья. В случае применения отбойного устройства (б) жидкость направляется с высокой скоростью вдоль стенок корпуса тангенциально, что улучшает показатели сепарации и, соответственно, жидкость забрасывается в область выше устройства ввода сырья в меньшей степени, чем при его отсутствии. При применении лопастного устройства ввода сырья (а) заброса жидкости выше устройства не наблюдается, разделение парожидкостного сырья происходит непосредственно в лопастном устройстве. Таким образом, чтобы не допустить попадания жидкой фазы на нижнее контактное устройство укрепляющей секции колонны, тем самым не допускать снижения его массообменной эффективности, можно применять лопастное устройство ввода сырья, либо размещать тарелку высоко над уровнем ввода сырья, тем самым увеличивая высоту корпуса колонны.

На втором этапе расчетного исследования лопастного устройства ввода сырья рассматривалось влияние на показатели разделения и распределения потока следующих конструктивных параметров:

- ширина лопасти;
- расстояние между лопастями;
- угол поворота лопасти относительно перпендикуляра к плоскости выхода потока из устройства (Рисунок 3.22).

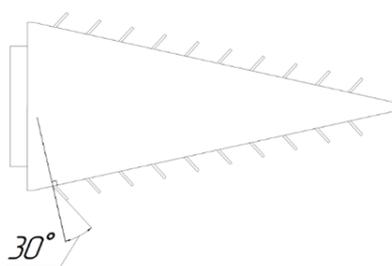
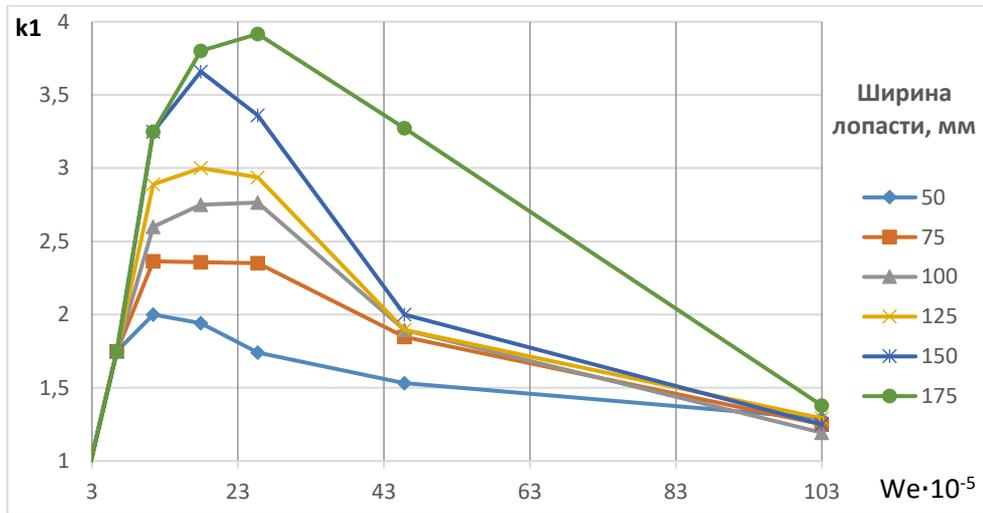


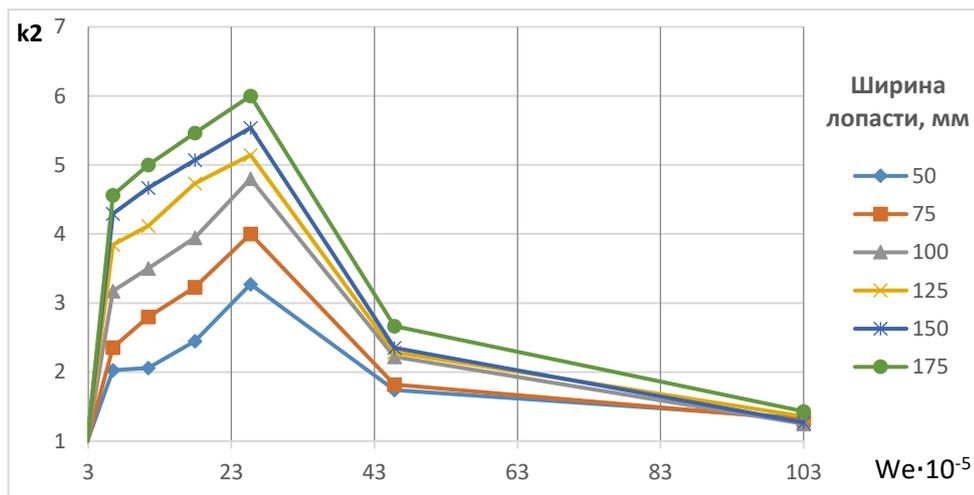
Рисунок 3.22 – К определению угла поворота лопасти (на Рисунке 30°)

Для каждого случая проводился расчет в диапазоне скоростей подачи сырья от 5 м/с до 30 м/с ($We = 2,86 \cdot 10^5 - 1,03 \cdot 10^7$).

Результаты расчетов исследования влияния ширины лопасти на работу устройства ввода сырья приведены на Рисунках 3.23, 3.24.



а



б

Рисунок 3.23 – Зависимость критериев высоты сепарационной зоны (а) и высоты зоны распределения (б) от критерия Вебера для потока сырья и ширины лопасти

Из графиков на Рисунке 3.23 видно, что увеличение ширины лопастей ведет к увеличению критерия высоты сепарационной зоны и критерия зоны распределения, это влияние особенно заметно при высоких скоростях сырьевого потока. Можно обратить внимание, наибольшие величины критериев наблюдаются для скорости 15 м/с (критерий Вебера $2,57 \cdot 10^6$), причем для устройства с шириной лопасти 175 мм критерий высоты сепарационной зоны в 2,25, критерий высоты

зоны распределения в 1,8 раз выше, чем для устройства с шириной лопасти 50 мм. Высокие значения критерия высоты сепарационной зоны: от 1,75 (скорость 7,5 м/с, ширина лопасти 50 мм) до 3,92 (скорость 15 м/с, ширина лопасти 175 мм), и критерия высоты зоны распределения: от 2,03 (скорость 7,5 м/с, ширина лопасти 50 мм) до 6,00 (скорость 15 м/с, ширина лопасти 175 мм) наблюдаются в области скоростей подачи сырья от 7,5 до 15 м/с (критерий Вебера $6,43 \cdot 10^5 - 2,57 \cdot 10^6$). При дальнейшем увеличении скорости подачи сырья значения критериев резко снижаются и приближаются к единице.

Нужно отметить, что увеличение ширины лопасти свыше 175 мм для рассматриваемого одноканального устройства ввода сырья не представляется возможным в связи с конструктивными особенностями. При увеличении ширины лопастей происходит нахлест наиболее отдаленных от штуцера ввода сырья расположенных в противоположных границах устройства лопастей друг на друга.

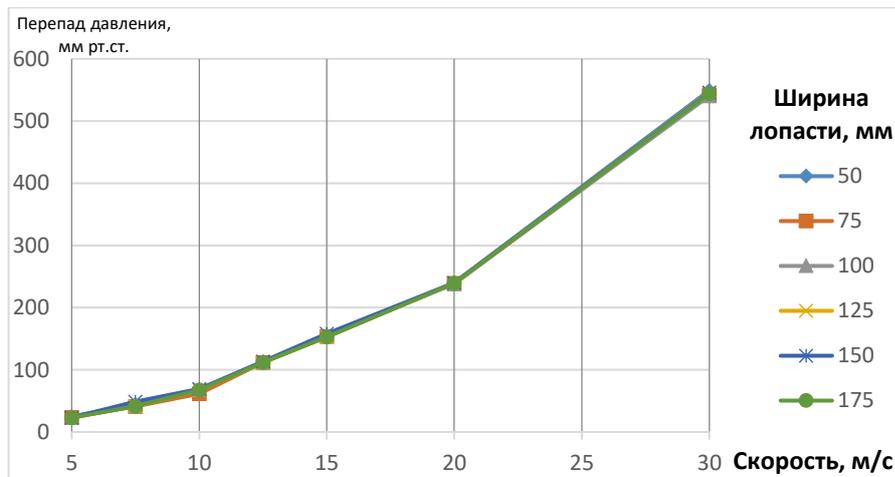


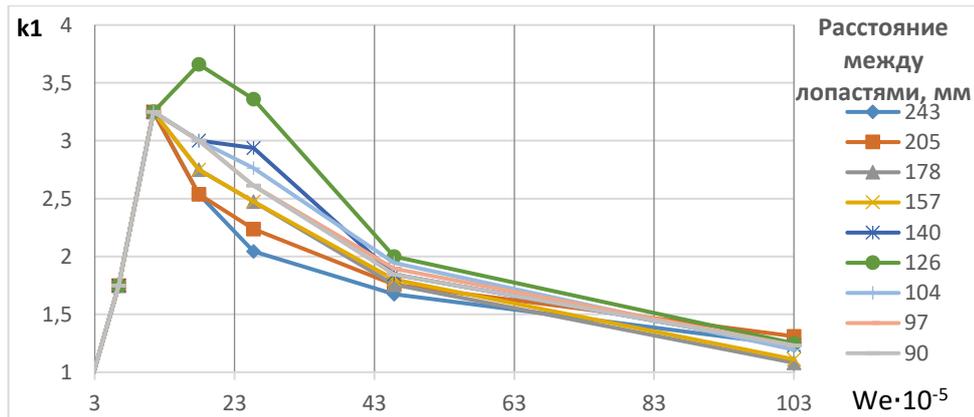
Рисунок 3.24 – Зависимость гидравлического сопротивления от скорости и ширины лопасти

Из графика на Рисунке 3.24 видно, что ширина лопастей практически не влияет на гидравлическое сопротивление.

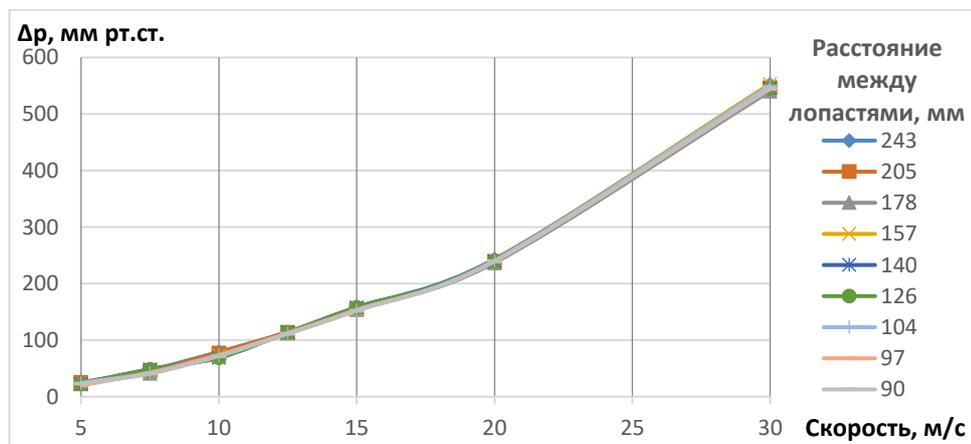
Следует отметить, что максимальная ширина лопастей, при которой достигается наибольшее значение критериев высот сепарационной зоны и зоны распределения обуславливается конструктивными особенностями: увеличение

ширины лопастей свыше 175 мм для рассматриваемой конструкции привела бы к необходимости уменьшения количества лопастей. Рекомендуется применять лопастные устройства ввода сырья с максимально возможной с точки зрения конструкции шириной лопастей.

Результаты расчетов влияния расстояния между лопастями на работу устройства ввода сырья приведены на Рисунке 3.25.



а



б

Рисунок 3.25 – Зависимость критерия высоты сепарационной зоны от критерия Вебера и расстояния между лопастями (а), гидравлического сопротивления от скорости и расстояния между лопастями (б)

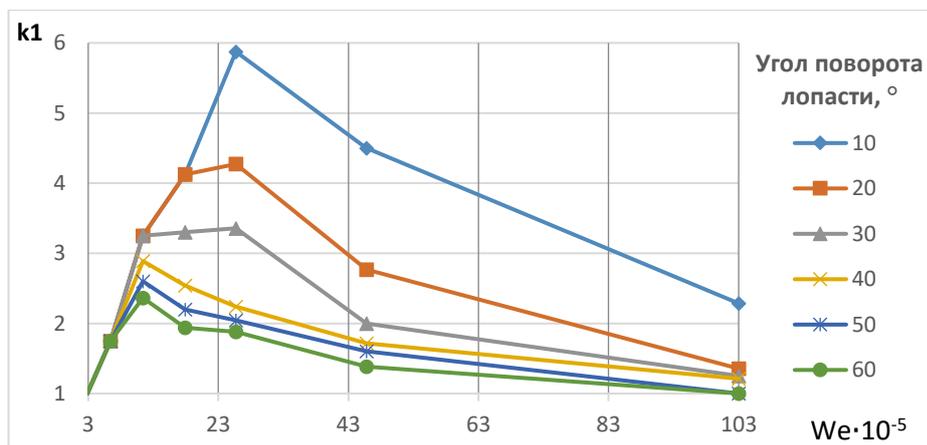
По результатам CFD-анализа обнаружено, что, наибольшее значение показателя высоты сепарационной зоны наблюдается при расстоянии между лопастями 126 мм (количестве лопастей 10 шт.), при скорости подачи сырья 10 –

15 м/с (значение критерия Вебера при этом $1,14 \cdot 10^6 - 2,57 \cdot 10^6$), при меньших значениях скорости подачи сырья количество лопастей практически не влияет на данный показатель. При увеличении скорости подачи сырья при любом расстоянии между лопастями происходит значительное (в 1,22 – 1,67 раз при изменении скорости от 15 до 20 м/с) снижение критерия высоты сепарационной зоны, его значение значительно не отличается при разном расстоянии между лопастями.

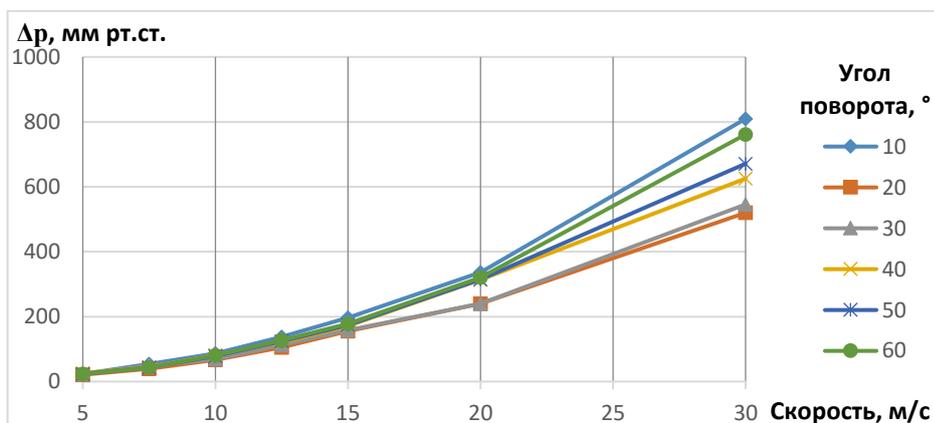
При увеличении расстояния между лопастями (уменьшении их количества) снижается доля потока, попадающего на лопасти, большая часть потока не взаимодействует с лопастями, теряет малую часть кинетической энергии, попадает на стенку корпуса напротив входного штуцера, что приводит к разбрызгиванию. При уменьшении расстояния между лопастями (увеличении их количества) уменьшается сечение для прохода жидкости, что увеличивает скорость потока между лопастями, и также в конечном итоге, это приводит к разбрызгиванию и попаданию жидкости в верхнюю часть колонны.

Количество лопастей практически не влияет на гидравлическое сопротивление.

Результаты расчетов исследования влияния угла поворота лопастей на работу устройства ввода сырья приведены на Рисунке 3.26. Из графика на Рисунке 3.26 видно, что увеличение угла поворота лопастей приводит к уменьшению показателя высоты сепарационной зоны в целом, при любых значениях скорости потока. При угле поворота 10° высота сепарационной зоны составляет 400 мм при скорости 15 м/с (значение критерия Вебера при этом $2,57 \cdot 10^6$), что позволяет рекомендовать устройство ввода именно такой конструкции для работы с сырьем при высокой скорости подачи, визуализация распределения потока жидкости при этом режиме показано на Рисунке 3.27. Ранее рассмотренные устройства не могли обеспечить разделение парожидкостной смеси на минимальной высоте сепарационной зоны при скорости 15 м/с. Значение критерия высоты сепарационной зоны достигает 5,9. Дальнейшее увеличение скорости подачи сырья ведет к увеличению высоты сепарационной зоны и снижению соответствующего критерия.



а



б

Рисунок 3.26 – Зависимость критерия высоты сепарационной зоны от критерия Вебера для потока сырья и угла поворота лопастей (а), гидравлического сопротивления от скорости и угла поворота лопастей (б)

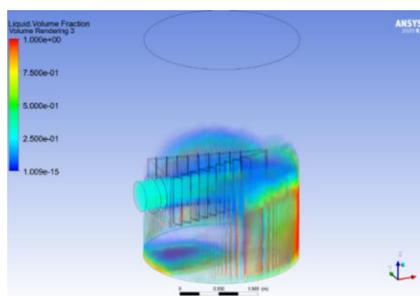


Рисунок 3.27 – Распределение потока жидкости по устройству ввода сырья при угле поворота лопасти 10° и скорости подачи сырья 15 м/с

Из Рисунка 3.27 видно, что поток при максимальном повороте имеет больший путь до корпуса колонны, что успокаивает поток, снижает его

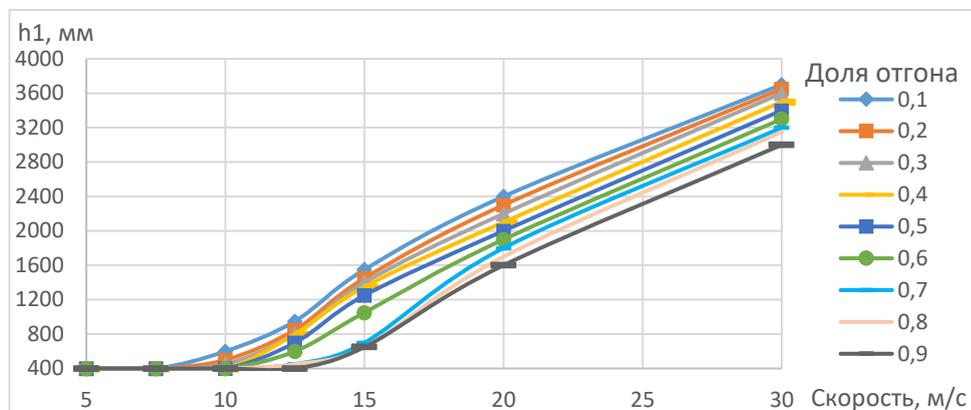
кинетическую энергию и обеспечивает хорошую сепарацию жидкости от газа. При больших углах поворота лопастей меньше путь потока до стенки колонны, а также инерционные силы, возникающие при повороте потока на меньший угол, в связи с этим критерий высоты сепарационной зоны снижается, и применение таких устройств нецелесообразно.

Гидравлическое сопротивление наибольшее для устройств ввода с углом поворота лопасти 10° и 60° . Первое связано с тем, что поток сырья совершает поворот практически под прямым углом, ударяясь при этом об стенку лопасти, а второе связано с слишком малым углом отклонения и возникающим смешиванием выходящих из устройства ввода потоков. Минимальное гидравлическое сопротивление наблюдается при угле поворота лопасти 20° , при дальнейшем увеличении этого показателя до 60° гидравлическое сопротивление при скорости 15 м/с увеличивается от 155,5 до 178,1 мм рт. ст., т.е. на 14,53%. Высокое гидравлическое сопротивление при больших углах поворота лопастей объясняется столкновением разделенных потоков после прохождения лопастей. Гидравлическое сопротивление при угле поворота лопасти 10° и скорости подачи 15 м/с составляет 196,4 мм рт. ст. Вероятно, это связано с высоким углом поворота жидкости и ударением потока жидкости об стенки колонны практически под прямым углом.

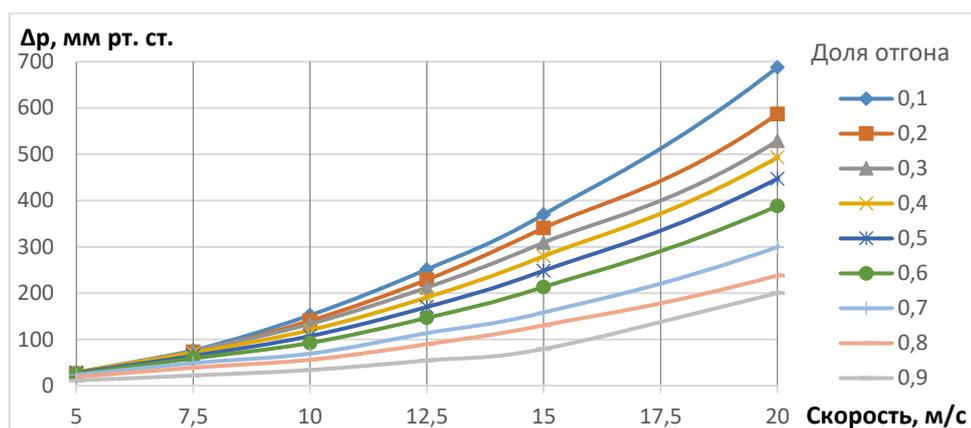
Таким образом, с точки зрения достижения максимального критерия высоты сепарационной зоны рекомендуется применять устройства ввода сырья с углом поворота лопасти 10° . Для вакуумных колонн, в которых имеет важную роль гидравлическое сопротивление внутренних устройств колонны, рекомендуется применять устройства ввода сырья с углом поворота лопасти 20° .

Применение правильно рассчитанных лопастных устройств ввода позволяет обеспечивать полную сепарацию парожидкостного сырья и распределение паровой части сырья по сечению аппарата, что позволит снижать энергозатраты на осуществление массообменного процесса, либо обеспечить получение продуктов колонны высокого качества [127].

Результаты расчета высоты сепарационной зоны и гидравлического сопротивления в зависимости от скорости подачи сырья и доли отгона приведены на графиках на Рисунке 3.28.



а

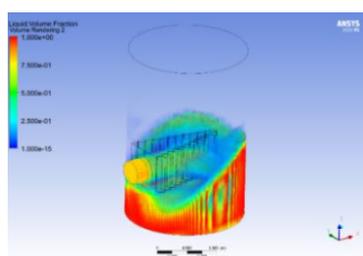


б

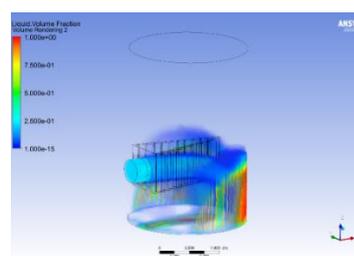
Рисунок 3.28 – Зависимость высоты сепарационной зоны (а) и гидравлического сопротивления (б) от скорости подачи и доли отгона сырья

Лопастные устройства ввода сырья при рассмотренных значениях доли отгона 0,1 – 0,9 могут разделить паровую и жидкую фазы непосредственно в устройстве ввода сырья при скорости подачи ниже 7,5 м/с. При скорости подачи 7,5 – 10 м/с разделение непосредственно в устройстве ввода происходит при доле отгона 0,4 – 0,9. В целом, из графика на Рисунке 3.28 наблюдается следующая зависимость: чем выше доля отгона, тем ниже высота сепарационной зоны. Это можно объяснить малым содержанием жидкости в сырье, следовательно, меньшее количество жидкости необходимо отделить в устройстве ввода сырья. При

скорости подачи сырья 12,5 м/с высота сепарационной зоны изменяется от 950 мм (при доле отгона 0,1) до 450 мм (при доле отгона 0,8-0,9), т.е. уменьшается в 2,11 раза. При скорости подачи сырья 15 м/с высота сепарационной зоны изменяется от 1450 мм (при доле отгона 0,1) до 650 мм при (доле отгона 0,9), т.е. уменьшается в 2,2 раза. Визуализация распределения потока жидкости при скорости 15 м/с показана на Рисунке 3.29.



а) Доля отгона 0,2



б) Доля отгона 0,8

Рисунок 3.29 – Визуализация распределения потока жидкости при скорости 15 м/с

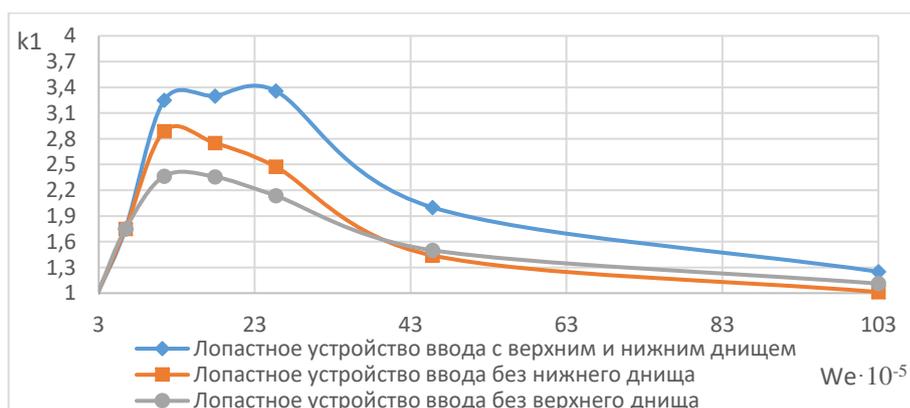
Как видно из Рисунка 3.29, при малой доле отгона 0,2 и скорости подачи сырья 15 м/с, большое количество жидкости, частично направляясь вдоль лопастей и частично попадая в зону напротив штуцера ввода сырья, заполняют собой большую часть сечения колонны, сталкиваются со стенкой корпуса колонны, вследствие чего возникает эффект разбрызгивания капель жидкости. Данный эффект распространяется почти по всей поверхности стенки колонны (красная область на Рисунке 3.29). 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, в основном, в области напротив штуцера ввода сырья.

Как видно из Рисунка 3.28, гидравлическое сопротивление в устройстве ввода сырья увеличивается с увеличением скорости подачи сырья, по квадратичному закону, что соответствует уравнению Дарси-Вейсбаха. Чем выше доля отгона сырья, тем ниже гидравлическое сопротивление. При низких долях отгона большое содержание жидкости в парожидкостном потоке, этим объясняется высокий перепад давления. При скорости 5 м/с гидравлическое сопротивление

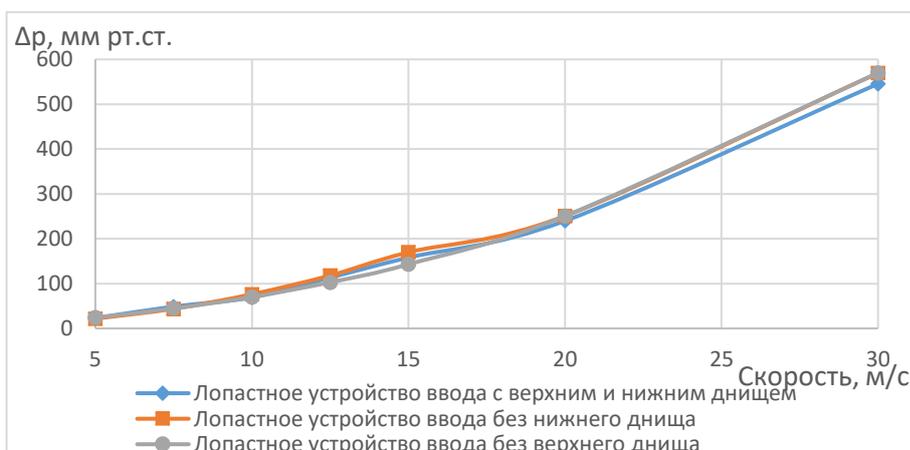
лежит в диапазоне от 11,2 мм рт. ст. до 29,0 мм рт. ст. При скорости подачи сырья 15 м/с наблюдается гидравлическое сопротивление от 79,3 мм рт. ст. (при доле отгона 0,9) до 369,8 мм рт. ст. (при доле отгона 0,1), т.е. увеличивается в 4,66 раз.

По результатам расчета можно сделать вывод, что доля отгона сырья влияет на показатели разделения парожидкостного сырья в лопастном устройстве ввода. Чем ниже доля отгона, тем выше высота сепарационной зоны и гидравлическое сопротивление, что связано с большим содержанием жидкости, плотность которой значительно выше, чем у газа [128].

Результаты исследования влияния наличия верхнего и нижнего днища лопастного устройства ввода сырья на высоту сепарационной зоны показаны на графике на Рисунке 3.30.



а



б

Рисунок 3.30 – Зависимость критерия высоты сепарационной зоны (а) от критерия Вебера для потока сырья, гидравлического сопротивления (б) от скорости сырья

Применение лопастных устройств ввода сырья с нижним днищем позволяет уменьшить высоту сепарационной зоны на 36% по сравнению с устройством ввода без нижнего днища при скорости подачи сырья 15 м/с (значение критерия Вебера при этом $2,57 \cdot 10^6$). При скорости подачи сырья 10 м/с и ниже высота сепарационной зоны минимальна, разделение паровой и жидкой фазы происходит в устройстве ввода сырья. Применение лопастных устройств ввода сырья с верхним днищем позволяет уменьшить высоту сепарационной зоны на 57% по сравнению с устройством ввода без верхнего днища при скорости подачи сырья 15 м/с (значение критерия Вебера при этом $2,57 \cdot 10^6$). Гидравлическое сопротивление лопастных устройств ввода с верхним и нижнем днищем и без верхнего или нижнего днища отличаются незначительно. Таким образом, рекомендуется применение лопастных устройств ввода с нижним днищем, так как они позволяют обеспечивать сепарацию при меньшей на 36% высоте сепарационной зоны, чем в случае применения устройств ввода без нижнего днища, а гидравлическое сопротивление данных устройств отличается незначительно [129].

На следующем этапе произведена систематизация полученных расчетных данных с получением эмпирических уравнений, связывающих отдельные конструктивные параметры устройств ввода сырья, скорость потока и высоту сепарационной зоны, зоны распределения сырья.

Так как вид зависимостей на графике носит параболический характер, была проведена аппроксимация экспериментальных данных с применением квадратичного полинома [130]. Рассмотрим пример проведения аппроксимации зависимости критерия высоты сепарационной зоны k_1 от критерия Вебера и ширины лопасти. Для этого случая квадратичный полином и минимизирующая функция выглядят следующим образом:

$$k_{1\text{расч.}} = a_1 We^2 + a_2 We + a_3 b^2 + a_4 b + a_0 \quad (3.13)$$

$$F = \sum_{i=1}^n \left(k_{1\text{э}i} - (a_1 We_i^2 + a_2 We_i + a_3 b_i^2 + a_4 b_i + a_0) \right)^2 \rightarrow \min \quad (3.14)$$

Задача поиска значений a_1, a_2, a_3, a_4, a_0 , при котором значение F минимально, решалась путем решения системы уравнений:

$$\begin{aligned}
\frac{dF}{da_1} &= -2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(k_{1\text{э}ij} - (a_1 We_i^2 + a_2 We_i + a_3 b_j^2 + a_4 b_j + a_0) \right) \cdot We_i^2 = 0 \\
\frac{dF}{da_2} &= -2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(k_{1\text{э}i} - (a_1 We_i^2 + a_2 We_i + a_3 b_j^2 + a_4 b_j + a_0) \right) \cdot We_i = 0 \\
\frac{dF}{da_3} &= -2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(k_{1\text{э}i} - (a_1 We_i^2 + a_2 We_i + a_3 b_j^2 + a_4 b_j + a_0) \right) \cdot b_j^2 = 0 \\
\frac{dF}{da_4} &= -2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(k_{1\text{э}i} - (a_1 We_i^2 + a_2 We_i + a_3 b_j^2 + a_4 b_j + a_0) \right) \cdot b_j = 0 \\
\frac{dF}{da_0} &= -2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(k_{1\text{э}i} - (a_1 We_i^2 + a_2 We_i + a_3 b_j^2 + a_4 b_j + a_0) \right) = 0
\end{aligned} \tag{3.15}$$

В преобразованном виде:

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k_{1\text{э}ij} \cdot We_i^2 &= a_1 \sum_{i=1}^n We_i^4 \cdot m + a_2 \sum_{i=1}^n We_i^3 \cdot m + a_3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_j^2 We_i^2 + a_4 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_j We_i^2 + a_0 \sum_{i=1}^n We_i^2 \cdot m \\
\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k_{1\text{э}ij} \cdot We_i &= a_1 \sum_{i=1}^n We_i^3 \cdot m + a_2 \sum_{i=1}^n We_i^2 \cdot m + a_3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_j^2 We_i + a_4 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_j We_i + a_0 \sum_{i=1}^n We_i \cdot m \\
\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k_{1\text{э}ij} \cdot b_j^2 &= a_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m We_i^2 b_j^2 + a_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m We_i b_j^2 + a_3 \sum_{j=1}^m b_j^4 \cdot n + a_4 \sum_{j=1}^m b_j^3 \cdot n + a_0 \sum_{j=1}^m b_j^2 \cdot n \\
\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k_{1\text{э}ij} \cdot b_j &= a_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m We_i^2 b_j + a_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m We_i b_j + a_3 \sum_{j=1}^m b_j^3 \cdot n + a_4 \sum_{j=1}^m b_j^2 \cdot n + a_0 \sum_{j=1}^m b_j \cdot n \\
\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k_{1\text{э}ij} &= a_1 \sum_{i=1}^n We_i^2 \cdot m + a_2 \sum_{i=1}^n We_i \cdot m + a_3 \sum_{j=1}^m b_j^2 \cdot n + a_4 \sum_{j=1}^m b_j \cdot n + a_0 nm
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Полученная система уравнений решалась методом Крамера с применением программы MS Excel [124,125,130]. В результате обработки результатов CFD-анализа получено следующее уравнение:

$$k_{1\text{расч.}} = -0,00004We^2 - 0,022We + 10,615b + 1,985 \tag{3.17}$$

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

b – ширина лопасти, м.

Следует отметить, если $k_{1\text{расч.}} < 1$, то необходимо принять $k_{1\text{расч.}} = 1$, данное ограничение связано с тем, что высота сепарационной зоны конструктивно не может быть меньше высоты самого устройства ввода.

Для оценки точности полученного уравнения применен показатель средней погрешности, вычисляемой по формуле:

$$e = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{k_{1\text{э}кспi} - k_{1\text{расч}i}}{k_{1\text{э}кспi}} \cdot 100\% \right) \tag{3.18}$$

Для уравнения 3.17 среднее значение погрешности составило 8,03%.

Аналогичным образом было получено уравнение зависимости критерия высоты сепарационной зоны k_1 от критерия Вебера и расстояния между лопастями:

$$k_{1\text{расч.}} = 0,00032We^2 - 0,059We - 15,96004r^2 + 3,024r + 3,831 \quad (3.19)$$

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

r – расстояние между лопастями, м.

Для уравнения 3.17 среднее значение погрешности составило 4,96%.

Данные уравнения применимы 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.

Для лопастного устройства ввода сырья были проведено моделирование работы данного устройства на других средах. Работа лопастного устройства ввода сырья при условиях повышенного давления в аппарате смоделирована на примере деэтанатора [114]. Условия работы колонны описаны в главе 3.1, состав разделяемого сырья приведен в Таблице 3.4. Результаты моделирования приведены в Таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Результаты моделирования гидродинамики лопастного устройства ввода деэтанатора

Скорость потока, м/с	Критерий Вебера $We \cdot 10^{-5}$	Высота сепарационной зоны h_1 , мм	Критерий высоты сепарационной зоны k_1	Высота зоны распределения h_2 , мм	Критерий высоты зоны распределения k_2	Перепад давления Δp , мм рт.ст.
5	5,14	400	1,00	1000	2,00	21,0
7,5	11,6	400	2,00	700	2,29	44,4
10	20,5	450	2,89	600	2,75	70,0
12,5	32,1	750	2,47	950	1,95	112,5
15	46,2	1100	1,82	1100	1,82	164,2

Сравнивая результаты моделирования лопастного устройства ввода для разных сред, по Таблицам 3.13 и 3.14, следует отметить, что наибольшая эффективность работы устройства достигнута для значения критерия Вебера около $2 \cdot 10^6$. При высоком давлении эффективность работы лопастного устройства несколько снижается (максимальный k_1 для среды C_1 - C_4 равен 3,30, k_2 – 3,33, для

среды пирогаза максимальный k_1 равен 2,89, k_2 – 2,75, что меньше в 1,21 раз). Гидравлическое сопротивление лопастного устройства ввода сырья в рассматриваемых средах отличается не больше чем в 1,10 раз [131].

Работа лопастного устройства ввода сырья при условиях пониженного давления (вакуума) в аппарате смоделирована на примере колонны очистки фенольной фракции. Данная колонна применяется для отделения от фенольной фракции примесей фенольной смолы [132]. Сырье колонны имеет состав, приведенный в Таблице 3.15. Перегонка фенольной фракции осуществляется под вакуумом (55 мм рт. ст.). Температура сырья 125 °С, доля отгона сырья – 0,09.

Таблица 3.15 – Состав сырья колонны очистки фенольной фракции

Компонент	Содержание, % масс.
Фенол	84,52
Метилфенилкетон	4,78
Диметилфенилкарбинол	0,60
Окись мезитила	0,05
Альфа-метилстирол	0,27
Вода	0,01
Тяжелые компоненты	9,77

В результате моделирования гидродинамики потока в лопастном устройстве ввода сырья колонны очистки фенольной фракции получены результаты, приведенные в Таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Результаты моделирования гидродинамики лопастного устройства ввода колонны очистки фенольной фракции

Скорость потока, м/с	Критерий Вебера $We \cdot 10^{-5}$	Высота сепарационной зоны h_1 , мм	Критерий высоты сепарационной зоны k_1	Высота зоны распределения h_2 , мм	Критерий высоты зоны распределения k_2	Перепад давления Δp , мм рт.ст.
5	3,79	400	1,00	4000	1,00	50,9
7,5	8,52	400	1,25	1650	1,21	145,9
10	15,1	550	1,82	1200	1,67	294,7
12,5	23,7	850	1,94	950	2,11	484,2
15	34,1	1250	1,60	1100	1,82	723,7

По результатам моделирования можно сделать вывод, что лопастное устройство ввода сырья позволяет обеспечить полную сепарацию парожидкостного сырья при скорости подачи 7,5 м/с и меньше. Высота сепарационной зоны возрастает в 3,13 раз при увеличении скорости подачи сырья до 15 м/с. Наибольшая эффективность работы устройства достигнута для значения критерия Вебера около $2,37 \cdot 10^6$, что соответствует выводам, сделанным ранее. Гидравлическое сопротивление выше, чем для рассмотренных ранее случаев. Это связано с высоким содержанием жидкой фазы. Изменение перепада давления от скорости потока соответствует уравнению Дарси-Вейсбаха. Учитывая важность сохранения низкого давления в вакуумной колонне очистки фенола, лопастное устройство ввода сырья в ней применять не рекомендуется [133].

Работа лопастного устройства ввода сырья при условиях повышенного давления в аппарате смоделирована на примере колонны деизопентанизации изомеризата [113]. Условия работы колонны описаны в главе 3.1, состав разделяемого сырья приведен в Таблице 3.4. Результаты моделирования приведены в Таблице 3.17 [131].

По результатам моделирования можно сделать вывод, что лопастное устройство ввода сырья позволяет обеспечить полную сепарацию парожидкостного сырья при скорости подачи 10 м/с и меньше. Наибольшая эффективность работы устройства достигнута для значения критерия Вебера около $2,49 \cdot 10^6$, что также соответствует выводам, сделанным ранее.

Таблица 3.17 – Результаты моделирования гидродинамики лопастного устройства ввода деизопентанизатора

Скорость потока, м/с	Критерий Вебера $We \cdot 10^{-5}$	Высота сепарационной зоны h_1 , мм	Критерий высоты сепарационной зоны k_1	Высота зоны распределения h_2 , мм	Критерий высоты зоны распределения k_2	Перепад давления Δp , мм рт.ст.
5	4,00	400	1,00	4000	1,00	25,0
7,5	8,97	400	1,63	1550	1,94	60,0
10	16,0	400	2,88	1300	3,31	96,9
12,5	24,9	450	3,67	1550	2,80	153,0
15	35,9	1050	2,10	2000	1,68	222,7

Смоделирована гидродинамика потока в лопастном устройстве ввода сырья для разных сред и условий процесса. Показано, что при низких долях отгона применение лопастного устройства ввода нецелесообразно, в то время как в большом содержании паровой фазы в потоке сырья рекомендуется применение лопастного устройства ввода сырья. Наиболее высокое значение критерия высоты сепарационной зоны достигается при значениях критерия Вебера $2,0 \cdot 10^6 - 2,5 \cdot 10^6$: для вакуумной колонны очистки фенола максимальное значение критериев высоты сепарационной зоны и зоны распределения составляют 1,94, 2,11 соответственно, для деизопентанизатора 3,67, 2,80 соответственно, для колонны разделения углеводородов C_1-C_4 3,66, 5,54 соответственно, для колонны дезтанизации 2,89, 2,75 соответственно.

Таким образом, проведено численное исследование влияния различных конструктивных (ширина лопасти, расстояние между лопастями, угол поворота лопастей, наличие нижнего днища) и технологических (доля отгона сырья) параметров на критерии высоты сепарационной зоны и зоны распределения лопастного устройства ввода, его гидравлическое сопротивление. Отметим, что:

- наибольшее значение критериев высоты сепарационной зоны и зоны распределения обнаружено для значения критерия Вебера $2,0 \cdot 10^6 - 2,5 \cdot 10^6$ для различных сред. Для углеводородных сред с повышенным давлением наибольшее значение критерия высоты сепарационной зоны составляет 2,75 – 3,31, критерия высоты зоны распределения 2,75 – 5,54, а для фенольной среды под вакуумом максимальное значение составило критерия высоты сепарационной зоны 1,94, критерия высоты зоны распределения 2,11.

- увеличение ширины лопастей приводит к увеличению критерия высоты сепарационной зоны, при этом на гидравлическое сопротивление данный параметр не оказывает существенного влияния;

- при исследовании расстояния между лопастями, наиболее высокое значение критерия высоты сепарационной зоны наблюдалось при расстоянии между лопастями 126 мм, при этом на гидравлическое сопротивление данный параметр не оказывает существенного влияния;

- при исследовании влияния угла поворота лопастей обнаружено, что наибольшее значение критерия сепарационной зоны наблюдалось при угле поворота лопасти 10° , гидравлическое сопротивление минимально при угле поворота лопасти 20° ;

- при увеличении доли отгона сырья уменьшается высота сепарационной зоны и гидравлическое сопротивление;

- устройство ввода сырья с верхним и нижним днищем имеет на 36% более высокое значение критерия высоты сепарационной зоны, чем без днищ, гидравлическое сопротивление практически не зависит от этого параметра;

- разработаны эмпирические уравнения: зависимости критерия высоты сепарационной зоны от критерия Вебера и ширины лопасти, зависимости критерия высоты сепарационной зоны от критерия Вебера и расстояния между лопастями.

3.2.3 Двухканальное V-образное лопастное устройство ввода сырья

В данной главе описываются результаты исследования влияния конструкции двухканального V-образного лопастного устройства ввода сырья на процесс разделения парожидкостного сырья и распределения парового потока по сечению колонны. 3D-модель устройства ввода представлена на Рисунке 3.31.

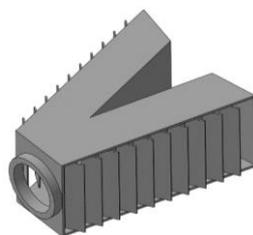


Рисунок 3.31 – 3D-модель V-образного двухканального лопастного устройства ввода сырья

Рассматриваемое устройство ввода имеет два направляющих канала по ходу потока, что позволяет увеличить эффективность сепарации двухфазного потока за счет снижения кинетической составляющей вводимого потока сырья [134].

Моделируемое лопастное устройство ввода сырья имеет расстояние между лопастями принято 126 мм. Ширина лопасти 150 мм, угол поворота 30°: геометрические параметры устройства приняты подобными лопастному устройству ввода, описанному в главе 3.3, для сравнения устройств между собой.

На первом этапе расчетов исследовалась зависимость показателей от скорости подаваемого потока. Сырьем является углеводородный поток, принятый при исследовании влияния степени разделения сырья в узле ввода (глава 3.1).

Расчет в ANSYS CFX, как и ранее, проводился согласно модели турбулентности потока k-ε. Расчетная сетка тетраэдрической формы, размер элемента сетки 10 мм, размер элемента сетки возле стенок и лопастей узла ввода сырья уменьшается до 1 мм, что необходимо для правильного и адекватного расчета гидродинамических явлений в пограничном слое. Количество элементов сетки на модель: 12-13 миллионов, в зависимости от конструкции лопастного устройства ввода сырья (например, при увеличении количества лопастей растет количество элементов сетки). Общий вид расчетной сетки (показан разрез элемента колонны в области устройства ввода сырья) приведен на Рисунке 3.32.

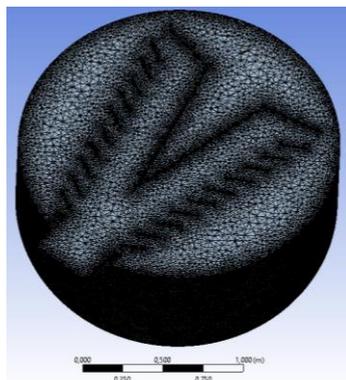


Рисунок 3.32 – Расчетная сетка для двухканального V-образного лопастного устройства ввода сырья

Граничные условия для расчета совпадают с граничными условиями для расчета отбойных устройств ввода сырья, описанных в главе 3.2.1.

На первом этапе расчетов исследовалась зависимости показателей от скорости подаваемого потока. Сырьем является углеводородный поток, принятый при исследовании влияния степени разделения сырья в узле ввода, которое было описано в главе 3.1. В результате моделирования гидродинамики потока в лопастном устройстве ввода получены результаты, приведенные в Таблице 3.18, на графиках на Рисунках 3.33-3.34, 3.36.

Таблица 3.18 – Результаты моделирования гидродинамики двухканального V-образного лопастного устройства ввода

Скорость потока, м/с	Критерий Вебера $We \cdot 10^{-5}$	Высота сепарационной зоны h_1 , мм	Критерий высоты сепарационной зоны k_1	Высота зоны распределения h_2 , мм	Критерий высоты зоны распределения k_2	Перепад давления Δp , мм рт.ст.
5	2,86	400	1,00	4000	1,00	24,37
7,5	6,43	450	1,56	3850	1,04	51,01
10	11,4	700	1,86	3050	1,20	72,74
12,5	17,9	850	1,94	1650	1,71	113,71
15	25,7	1150	2,04	2350	2,09	165,17
20	45,8	1700	2,11	1650	2,18	285,71
30	103	2650	1,51	2550	1,57	654,45

По результатам расчетов, приведенных на графике на Рисунке 3.33, можно отметить, что увеличение скорости подачи парожидкостного сырья приводит к увеличению показателя высоты сепарационной зоны и к увеличению показателя высоты зоны распределения в области скоростей до 20 м/с, далее оба показателя понижаются. Моделируемое лопастное устройство ввода сырья обеспечивает полное отделение жидкой фазы от паровой при скорости подачи сырья 5 м/с, чему соответствует значение критерия Вебера $2,86 \cdot 10^5$, и меньше. При скоростях подачи сырья 7,5 – 20 м/с (значение критерия Вебера $6,43 \cdot 10^5$ – $4,58 \cdot 10^6$) показатель высоты сепарационной зоны возрастает, что говорит о сохранении высокой эффективности лопастного устройства в данном диапазоне скоростей подачи сырья. При дальнейшем увеличении скорости потока критерий высоты сепарационной зоны снижается.

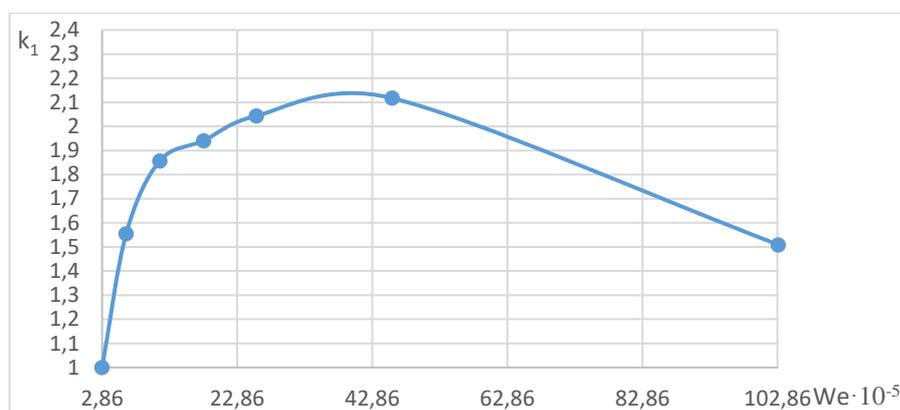


Рисунок 3.33 – Зависимость критерия высоты зоны сепарации от критерия Вебера сырьевого потока для двухканального V-образного лопастного устройства ввода

Как видно на Рисунке 3.34, увеличение скорости движения парового потока после сепарации (которая напрямую связана со скоростью подачи сырья) приводит к более сильной турбулизации, в результате чего распределение парового потока происходит более равномерно, что обуславливает рост показателя высоты зоны распределения. Таким образом, критерий высоты зоны распределения при скоростях подачи сырья 7,5 – 20 м/с (значение критерия Вебера $6,43 \cdot 10^5$ – $4,58 \cdot 10^6$) возрастает, далее он снижается. При малой скорости движения пара наблюдаются неравномерности распределения скоростей по сечению колонны, что может снизить эффективность работы нижних контактных устройств укрепляющей секции колонны.

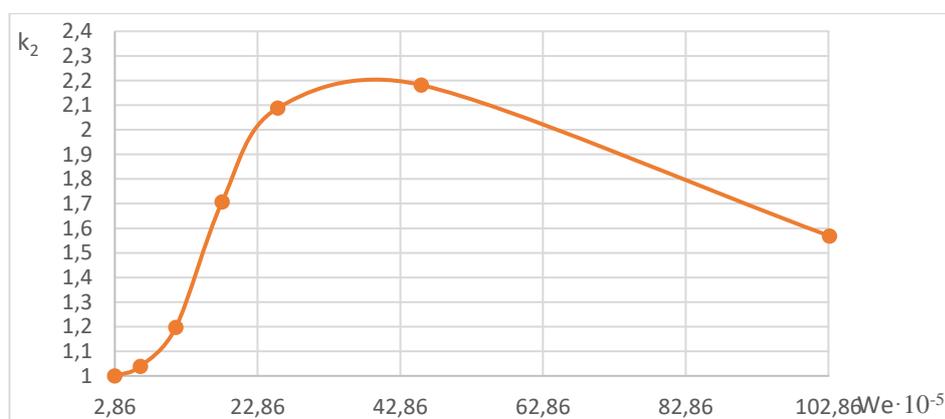
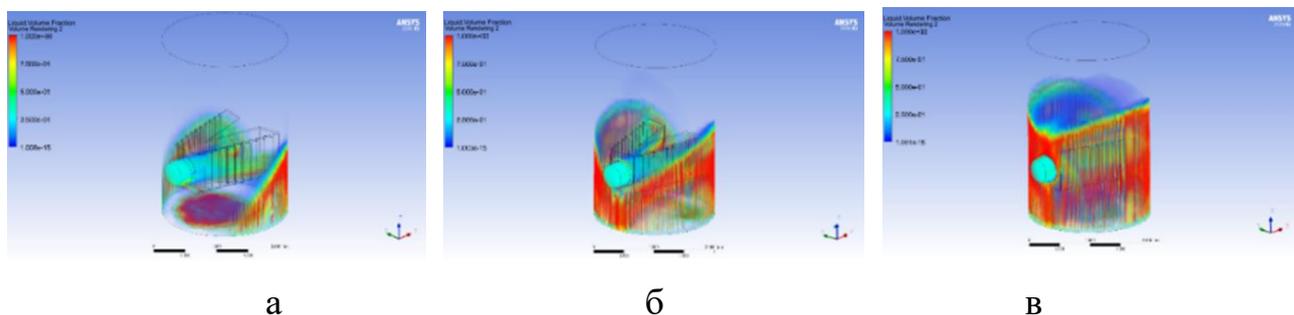


Рисунок 3.34 – Зависимость критерия высоты зоны распределения паровой фазы от критерия Вебера сырьевого потока для двухканального лопастного V-образного устройства ввода сырья

Визуализация распределения потока жидкости в двухканальном лопастном устройстве ввода сырья приведено на Рисунке 3.35.



а) скорость подачи сырья 5 м/с, б) 10 м/с, в) 15 м/с

Рисунок 3.35 – Распределение потока жидкой фазы в двухканальном V-образном лопастном устройстве ввода сырья

Несмотря на попадание жидкости в секцию колонны над устройством ввода сырья, вызывает интерес ее распределение. Большая часть жидкости концентрируется вдоль корпуса колонны, растекаясь по поверхности стенки в виде пленки. Такое распределение жидкости может привести к испарению легколетучих компонентов из жидкой фазы в паровую при контакте с восходящими парами из отгонной части ректификационной колонны, что улучшит массообмен. Однако, в данной работе рассматриваются только гидродинамические аспекты процесса, протекающего в устройствах ввода парожидкостного сырья.

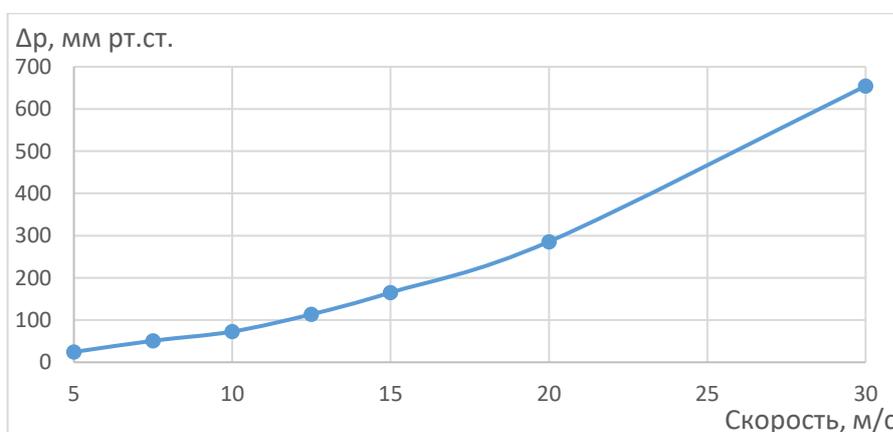
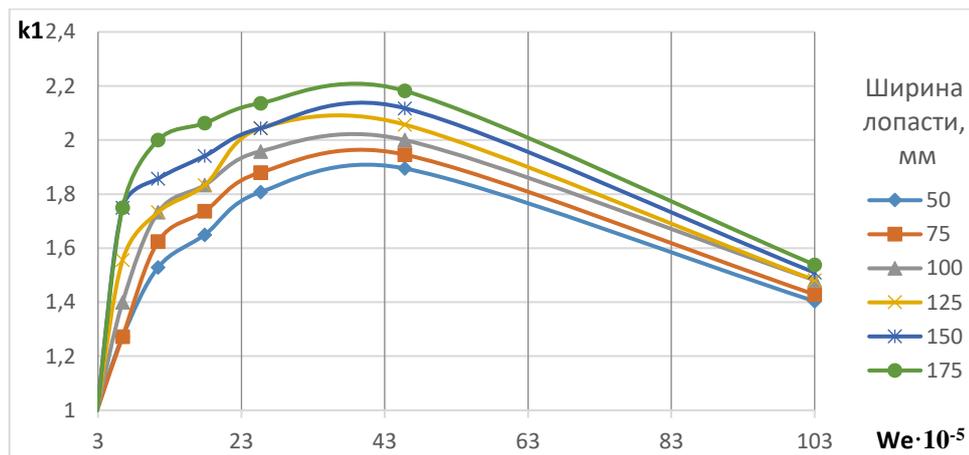


Рисунок 3.36 – Зависимость перепада давления в двухканальном лопастном V-образном устройстве ввода от скорости сырьевого потока

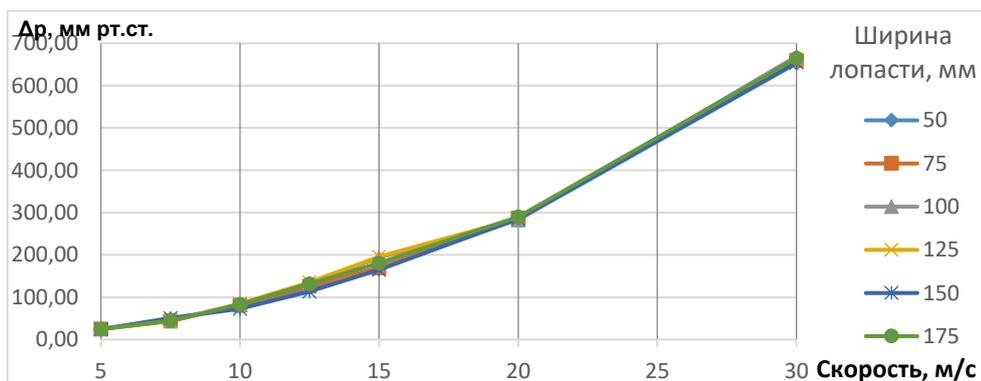
Перепад давления в устройстве ввода возрастает при увеличении скорости подачи сырья, зависимость, приведенная на Рисунке 3.36, носит квадратичный характер, что соответствует классическому уравнению Дарси-Вейсбаха. Коэффициент сопротивления ξ равен 1,374.

На втором этапе расчетного исследования двухканального лопастного устройства ввода сырья рассматривалось влияние на показатели работы устройства следующих конструктивных и технологических параметров: ширина лопасти, расстояние между лопастями, угол поворота лопасти, доля отгона сырья.

Для каждого случая проводился расчет в диапазоне скоростей подачи сырья от 5 м/с до 30 м/с. Результаты расчетов исследования влияния ширины лопасти на работу устройства ввода сырья приведены на Рисунке 3.37.



а



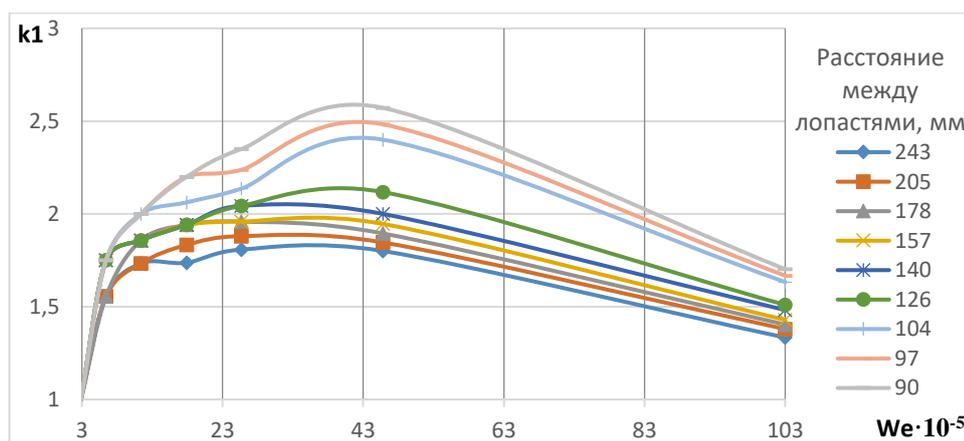
б

Рисунок 3.37 – Зависимость критерия высоты сепарационной зоны (а) от критерия Вебера для потока сырья и ширины лопасти, гидравлического сопротивления (б) от скорости и ширины лопасти

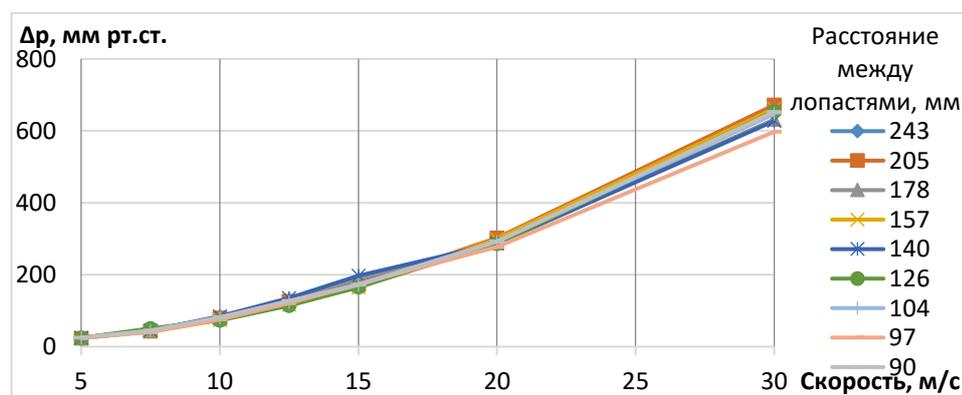
Из графика на Рисунке 3.37 видно, что увеличение ширины лопастей ведет к увеличению критерия высоты сепарационной зоны, это влияние особенно заметно при высоких скоростях сырьевого потока до 20 м/с (критерий Вебера $4,58 \cdot 10^6$). Можно обратить внимание, наибольшие величины критериев наблюдается для скорости 15 м/с (критерий Вебера $2,57 \cdot 10^6$), причем для устройства с шириной лопасти 175 мм критерий высоты сепарационной зоны в 1,15 раз выше, чем для устройства с шириной лопасти 50 мм. При увеличении скорости подачи сырья выше 20 м/с значение критерия высоты сепарационной зоны резко снижаются.

Ширина лопастей практически не влияет на гидравлическое сопротивление.

Результаты расчетов исследования влияния расстояния между лопастями на работу устройств ввода сырья приведены на Рисунке 3.38.



а



б

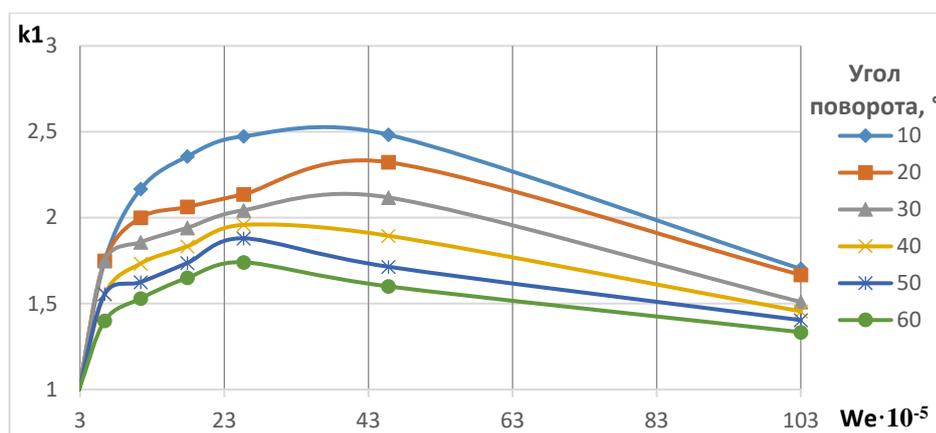
Рисунок 3.38 – Зависимость критерия высоты сепарационной зоны (а) от критерия Вебера и расстояния между лопастями, гидравлического сопротивления (б) от скорости и расстояния между лопастями

По результатам CFD-анализа обнаружено, что наибольшее значение критерия высоты сепарационной зоны наблюдается при расстоянии между лопастями 90 мм, особенно при скорости подачи сырья 10 – 20 м/с (значение критерия Вебера при этом $1,14 \cdot 10^6$ – $4,58 \cdot 10^6$), критерий высоты сепарационной зоны для устройства с расстоянием между лопастями 90 мм в 1,42 раза больше, чем для устройства с расстоянием между лопастями 243 мм. При значениях скорости подачи сырья до 7,5 м/с (значение критерия Вебера при этом до $6,43 \cdot 10^5$) количество лопастей практически не влияет на данный показатель. При увеличении скорости подачи сырья при любом расстоянии между лопастями происходит значительное (в 1,35 – 1,51 раз при изменении скорости от 20 до 30 м/с) снижение критерия высоты сепарационной зоны, его значение значительно не отличается при разном расстоянии между лопастями. Расстояние между лопастями практически не влияет на гидравлическое сопротивление.

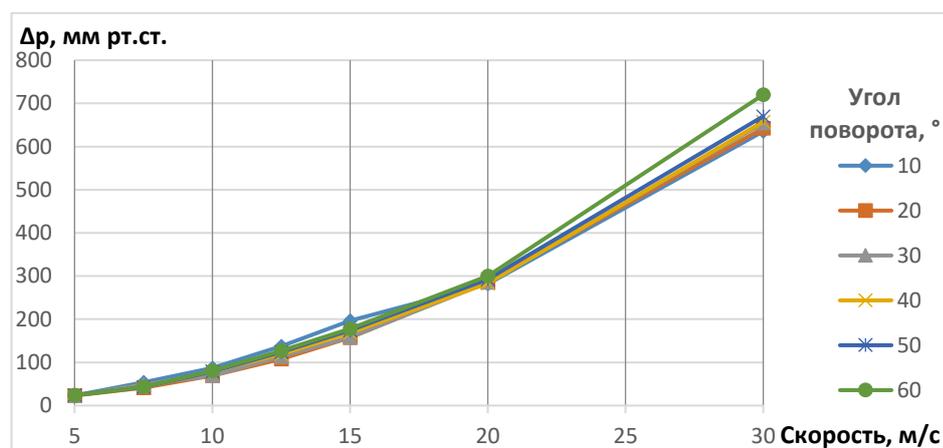
Результаты расчетов исследования влияния угла поворота лопастей на работу устройства ввода сырья приведены на Рисунке 3.39.

Из графика на Рисунке 3.39 видно, что увеличение угла поворота лопастей приводит к уменьшению показателя высоты сепарационной зоны в целом, при любой скорости подачи сырья. При угле поворота 10° достигается максимальное значение критерия высоты сепарационной зоны. При скорости 15 – 20 м/с, критерий высоты сепарационной зоны для угла поворота лопастей 10° на 7% выше, чем для устройства с углом поворота лопастей 20° , и в 1,42 – 1,55 раз выше, чем для устройства с углом поворота лопастей 60° . Аналогично классическому лопастному устройству ввода сырья, рекомендуется устройство ввода с углом поворота лопастей 10° для работы с сырьем при высокой скорости подачи.

Увеличение угла поворота лопастей приводит к увеличению высоты сепарационной зоны в целом, при любых значениях скорости потока, значительному увеличению высоты зоны распределения парового потока, также при любых значениях скорости потока. Угол поворота лопасти практически не влияет на гидравлическое сопротивление, при скорости 30 м/с наибольшее сопротивление имеет устройство ввода сырья с углом поворота лопасти 60° .



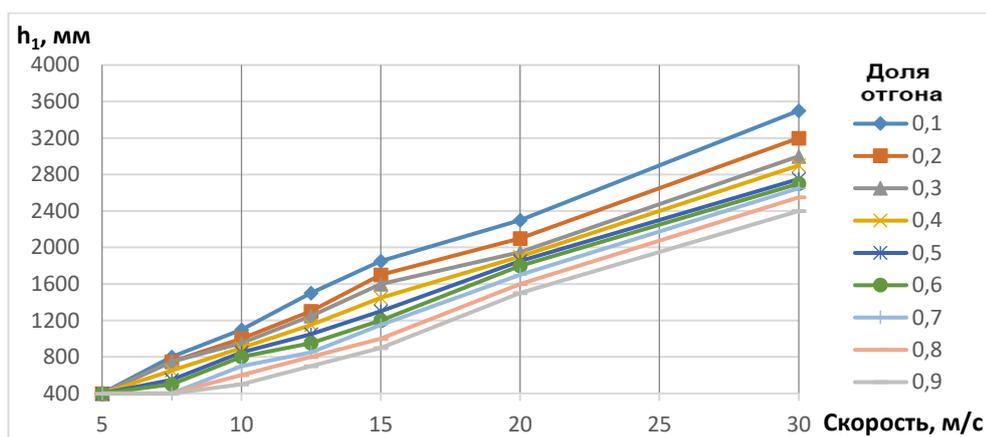
а



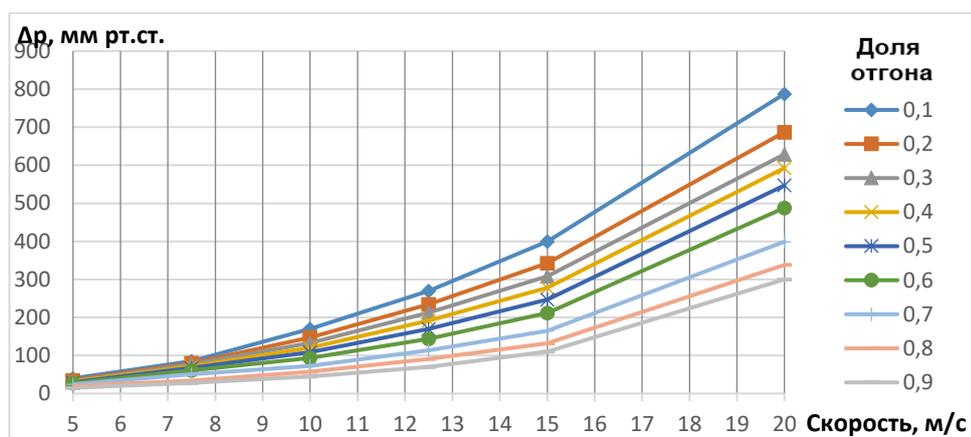
б

Рисунок 3.39 – Зависимость критерия высоты сепарационной зоны (а) от критерия Вебера для потока сырья и угла поворота лопастей, гидравлического сопротивления (б) от скорости и угла поворота лопастей

Результаты расчетов исследования влияния доли отгона на работу устройства ввода сырья приведены на Рисунке 3.40. Рассмотренные двухканальные лопастные устройства ввода сырья при рассмотренных значениях доли отгона 0,1 – 0,9 могут разделить паровую и жидкую фазы непосредственно в устройстве ввода сырья при скорости подачи ниже 5 м/с. При скорости подачи сырья 15 м/с высота сепарационной зоны при доле отгона 0,1 выше, чем при доле отгона 0,9, в 2,05 раз, при скорости подачи сырья 30 м/с высота сепарационной зоны при доле отгона 0,1 выше, чем при доле отгона 0,9, в 1,46 раз.



а



б

Рисунок 3.40 – Зависимость высоты сепарационной зоны (а) и гидравлического сопротивления (б) от скорости и доли отгона сырья

Рассмотренные двухканальные лопастные устройства ввода сырья при рассмотренных значениях доли отгона 0,1 – 0,9 могут разделить паровую и жидкую фазы непосредственно в устройстве ввода сырья при скорости подачи ниже 5 м/с. При скорости подачи сырья 15 м/с высота сепарационной зоны при доле отгона 0,1 выше, чем при доле отгона 0,9, в 2,05 раз, при скорости подачи сырья 30 м/с высота сепарационной зоны при доле отгона 0,1 выше, чем при доле отгона 0,9, в 1,46 раз. В целом, наблюдается следующая зависимость: чем выше доля отгона, тем ниже требуемая высота сепарационной зоны и гидравлическое сопротивление устройства ввода сырья.

На следующем этапе произведена систематизация полученных расчетных данных с получением эмпирических уравнений, связывающих отдельные

конструктивные параметры устройств ввода сырья, скорость потока и высоту сепарационной зоны, зоны распределения сырья.

Так как вид зависимостей на графике носит параболический характер, проведена аппроксимация экспериментальных данных с применением квадратичного полинома [130], аналогично расчетам в главе 3.3. В результате обработки результатов CFD-анализа получено уравнение зависимости критерия высоты сепарационной зоны от ширины лопасти и значения критерия Вебера:

$$k_{1\text{расч.}} = -0,00021We^2 + 0,0205We + 3,69848b^2 + 3,698b + 1,879 \quad (3.20)$$

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

b – ширина лопасти, м.

Для уравнения 3.20 среднее значение погрешности составило 2,59%.

Получено уравнение зависимости критерия высоты сепарационной зоны k_1 от критерия Вебера и расстояния между лопастями:

$$k_{1\text{расч.}} = -0,00019We^2 + 0,0179We + 21,4275r^2 - 10,0017r + 2,671 \quad (3.21)$$

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

r – расстояние между лопастями, м.

Для уравнения 3.21 среднее значение погрешности составило 2,75%.

Данные уравнения применимы 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.

Таким образом, проведено численное исследование влияния различных конструктивных (ширина лопасти, расстояние между лопастями, угол поворота лопастей) и технологических (доля отгона сырья) параметров на критерии высоты сепарационной зоны и зоны распределения двухканального V-образного лопастного устройства ввода сырья, его гидравлическое сопротивление. Отметим следующее:

- наибольшее значение критериев высоты сепарационной зоны и зоны распределения обнаружено для значения критерия Вебера $2,5 \cdot 10^6 - 4,5 \cdot 10^6$ что соответствует для среды углеводородов C_1-C_4 скорости подачи сырья 15-20 м/с;

- увеличение ширины лопастей приводит к увеличению критерия высоты сепарационной зоны, при этом на гидравлическое сопротивление данный параметр не оказывает существенного влияния;

- к увеличению критерия высоты сепарационной зоны приводит уменьшение расстояния между лопастями, при этом на гидравлическое сопротивление данный параметр не оказывает существенного влияния;

- к увеличению критерия высоты сепарационной зоны приводит уменьшение угла поворота лопастей, при этом на гидравлическое сопротивление данный параметр не оказывает существенного влияния;

- при увеличении доли отгона сырья уменьшается высота сепарационной зоны и гидравлическое сопротивление.

- разработаны эмпирические уравнения: зависимости критерия высоты сепарационной зоны от критерия Вебера и ширины лопасти, зависимости критерия высоты сепарационной зоны от критерия Вебера и расстояния между лопастями.

3.2.4 Двухканальное V-образное лопастное устройство ввода сырья с тангенциальными элементами

В данной главе описываются результаты исследования влияния конструкции двухканального V-образного лопастного устройства ввода сырья с тангенциальным элементом на процесс разделения парожидкостного сырья и распределения парового потока по сечению колонны. 3D-модель устройства ввода представлена на Рисунке 3.41.

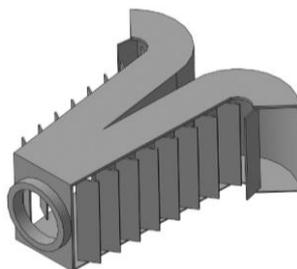


Рисунок 3.41 – 3D-модель двухканального V-образного лопастного устройства ввода сырья с тангенциальными элементами

Рассматриваемое устройство ввода имеет два направляющих канала по ходу потока с поворотом в конце канала, что позволяет увеличить эффективность сепарации двухфазного потока за счет снижения кинетической составляющей вводимого потока сырья и воздействия возникающих в поворотах центробежных сил [135]. Моделируемое устройство ввода сырья имеет расстояние между лопастями принято 126 мм. Ширина лопасти 150 мм, угол поворота 30°: геометрические параметры устройства приняты подобными лопастному устройству ввода сырья, описанному в главе 3.3, для адекватного сравнения устройств между собой.

На первом этапе расчетов исследовалась зависимости показателей от скорости подаваемого потока. Сырьем является углеводородный поток, принятый при исследовании влияния степени разделения сырья в узле ввода, которое было описано в главе 3.1.

Расчет в ANSYS CFX, как и ранее, проводился согласно модели турбулентности потока k-ε. Расчетная сетка тетраэдрической формы, размер элемента сетки 10 мм, размер элемента сетки возле стенок и лопастей узла ввода сырья уменьшается до 1 мм, что необходимо для правильного и адекватного расчета гидродинамических явлений в пограничном слое. Количество элементов сетки на модель: 12-13 миллионов, в зависимости от конструкции лопастного устройства ввода сырья (например, при увеличении количества лопастей растет количество элементов сетки). Вид расчетной сетки приведен на Рисунке 3.42.

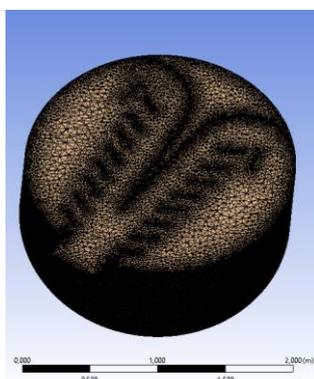


Рисунок 3.42 – Расчетная сетка для двухканального V-образного лопастного устройства ввода сырья с тангенциальными элементами

Граничные условия для расчета совпадают с граничными условиями для расчета отбойных устройств ввода сырья, описанных в главе 3.2.1.

В результате моделирования гидродинамики потока в лопастном устройстве ввода сырья с тангенциальными элементами получены результаты, приведенные в Таблице 3.19, на графиках на Рисунках 3.43-3.44, 3.46.

Таблица 3.19 – Результаты моделирования гидродинамики двухканального V-образного лопастного устройства ввода с тангенциальными элементами

Скорость потока, м/с	Критерий Вебера $We \cdot 10^{-5}$	Высота сепарационной зоны h_1 , мм	Критерий высоты сепарационной зоны k_1	Высота зоны распределения h_2 , мм	Критерий высоты зоны распределения k_2	Перепад давления Δp , мм рт.ст.
5	2,86	400	1,00	4000	1,00	24,04
7,5	6,43	400	1,75	3800	1,05	36,11
10	11,4	550	2,36	2900	1,26	67,84
12,5	17,9	650	2,54	1800	1,94	107,12
15	25,7	850	2,76	1300	2,73	156,24
20	45,8	1350	2,67	1350	2,67	292,58
30	103	2600	1,54	2500	1,60	657,86

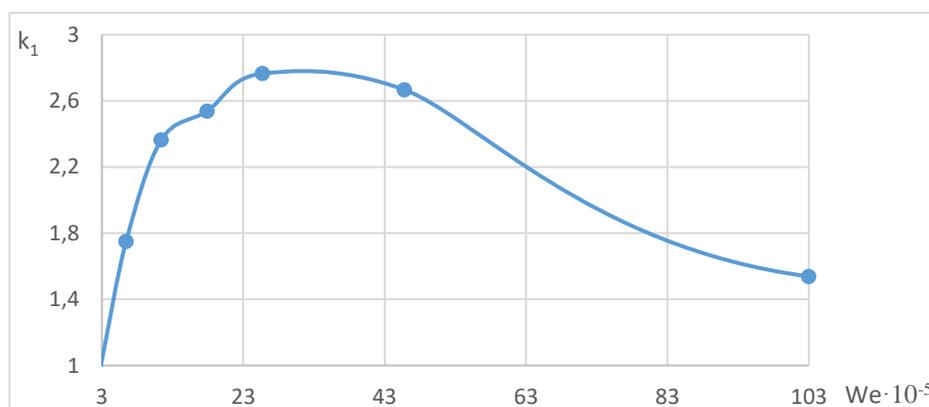


Рисунок 3.43 – Зависимость критерия высоты зоны сепарации от критерия Вебера для потока сырья для двухканального V-образного лопастного устройства ввода сырья с тангенциальными элементами

По результатам расчетов можно отметить, что увеличение скорости подачи парожидкостного сырья приводит к увеличению критерия высоты сепарационной зоны и к увеличению критерия высоты зоны распределения в области скоростей до 15 м/с, далее оба показателя понижаются. Моделируемое лопастное устройство

ввода сырья обеспечивает полное отделение жидкой фазы от паровой при скорости подачи сырья 5 м/с, чему соответствует значение критерия Вебера $2,86 \cdot 10^5$, и меньше. При скоростях подачи сырья 7,5 – 15 м/с (значение критерия Вебера $6,43 \cdot 10^5$ – $2,57 \cdot 10^6$) показатель высоты сепарационной зоны возрастает, что говорит о сохранении высокой эффективности рассматриваемого устройства в данном диапазоне скоростей подачи сырья. При дальнейшем увеличении скорости потока критерий высоты сепарационной зоны снижается.

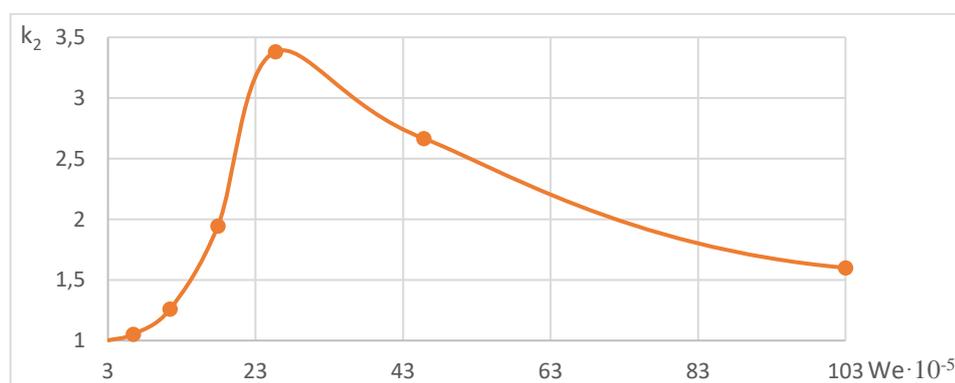
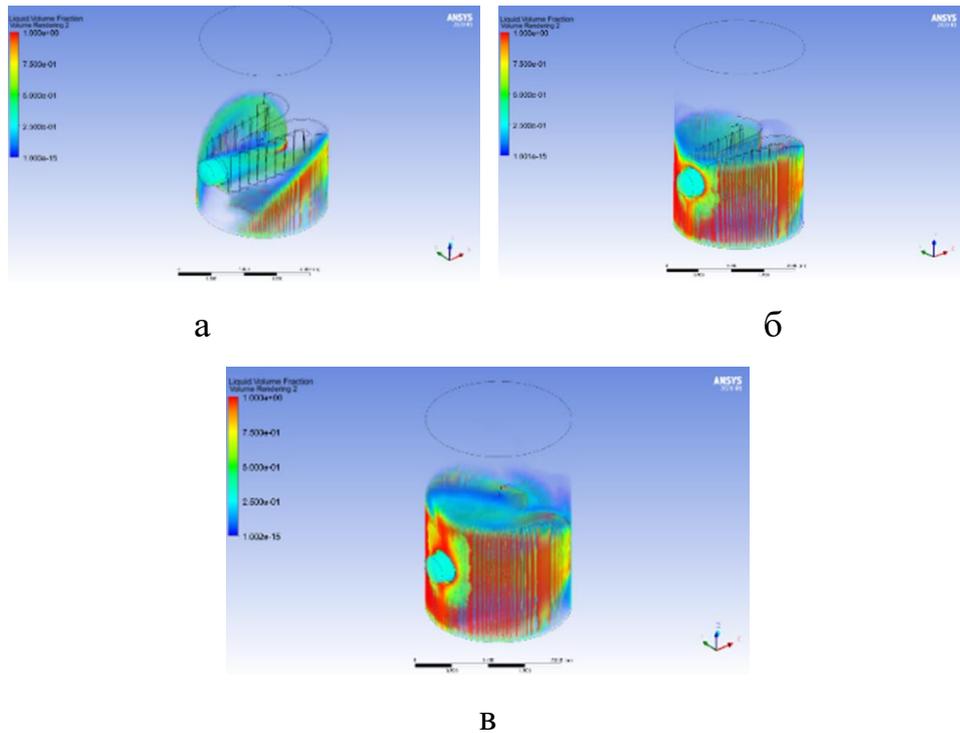


Рисунок 3.44 – Зависимость критерия высоты зоны распределения от критерия Вебера для потока сырья для двухканального V-образного лопастного устройства ввода сырья с тангенциальными элементами

Критерий высоты зоны распределения при скоростях подачи сырья 7,5 – 15 м/с (значение критерия Вебера $6,43 \cdot 10^5$ – $2,57 \cdot 10^6$) возрастает, далее он снижается. При малой скорости движения пара наблюдаются неравномерности распределения скоростей по сечению колонны, что может снизить эффективность работы нижних контактных устройств укрепляющей секции колонны. В целом, высота зоны распределения большая, что связано с центробежной составляющей устройства, она вызывает неравномерность распределения потока. Большие скорости потока пара наблюдаются у стенки колонны, малые скорости наблюдаются в центральной части сечения колонны.

Визуализация распределения потока жидкости в двухканальном V-образном лопастном устройстве ввода сырья с тангенциальными элементами приведено на Рисунке 3.45.



а) скорость подачи сырья 5 м/с, б) 10 м/с, в) 15 м/с

Рисунок 3.45 – Распределение потока жидкой фазы в двухканальном V-образного лопастном устройстве ввода сырья с тангенциальными элементами

Аналогично двухканальному лопастному устройству ввода сырья, несмотря на попадание жидкости в укрепляющую секцию колонны, вызывает интерес ее распределение. Большая часть жидкости концентрируется вдоль корпуса колонны, растекаясь по поверхности стенки в виде пленки, причем по сравнению с двухканальным лопастным устройством ввода сырья, эта пленка ниже по высоте. Это связано с влиянием центробежных сил, которые увеличивают эффективность сепарации жидкости от пара.

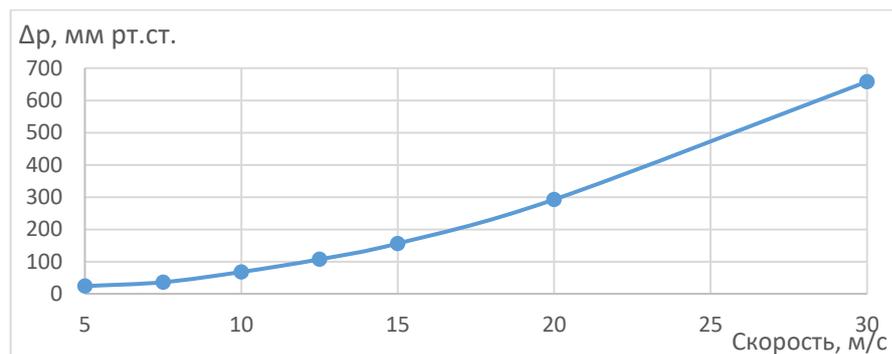
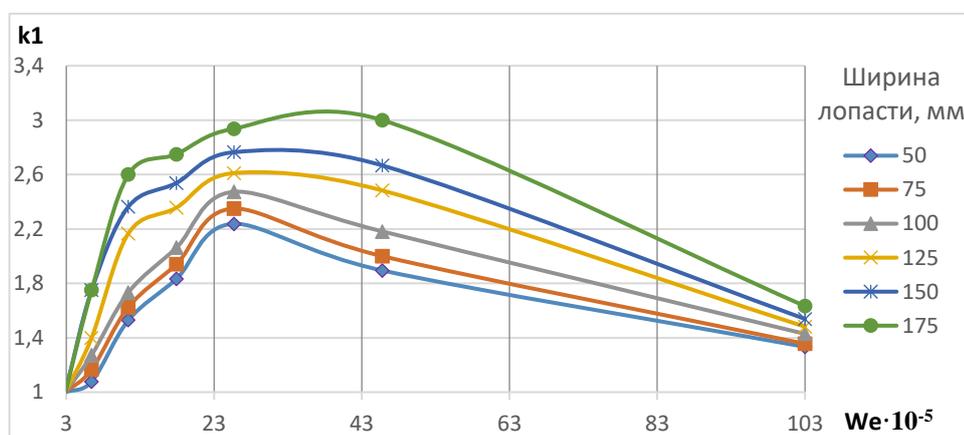


Рисунок 3.46 – Зависимость перепада давления от скорости сырьевого потока

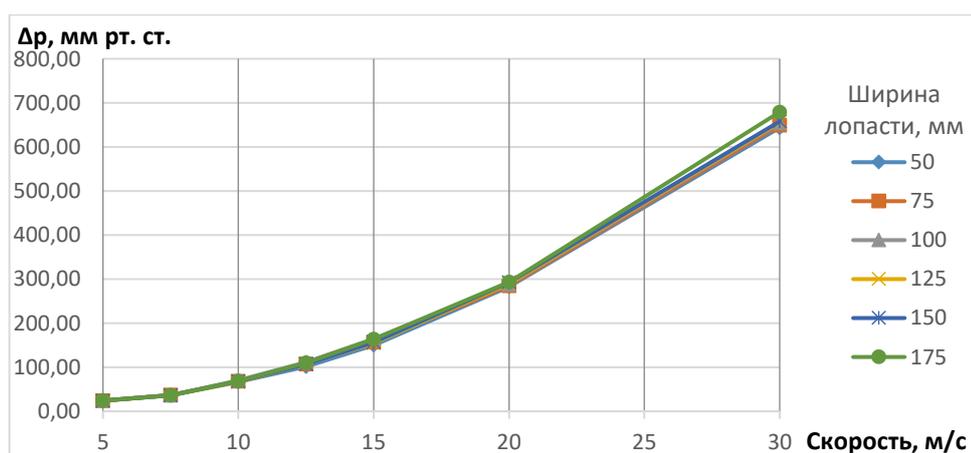
Перепад давления в устройстве ввода возрастает при увеличении скорости подачи сырья, зависимость имеет квадратичный характер. Коэффициент сопротивления ξ равен 1,236 [126].

На следующем этапе расчетного исследования двухканального лопастного устройства ввода сырья с тангенциальными элементами рассматривалось влияние на показатели работы устройства ряда параметров: ширина лопасти, расстояние между лопастями, угол поворота лопасти, доля отгона сырья.

Для каждого случая проводился расчет в диапазоне скоростей подачи сырья от 5 м/с до 15 м/с. Результаты расчетов исследования влияния ширины лопасти на работу устройства ввода сырья приведены на Рисунке 3.47.



а

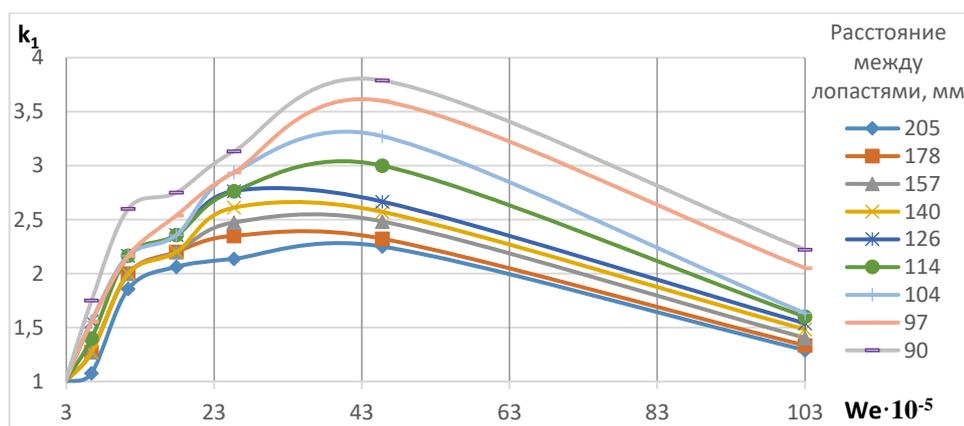


б

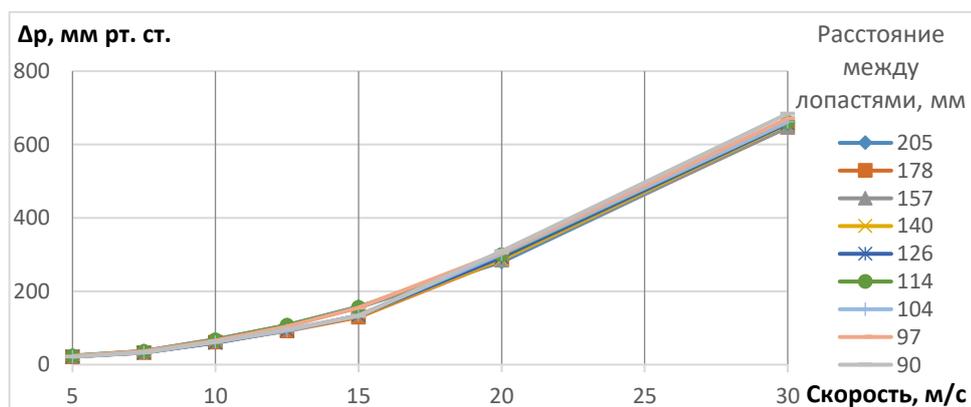
Рисунок 3.47 – Зависимость критерия высоты сепарационной зоны от критерия Вебера для потока сырья и ширины лопасти (а), гидравлического сопротивления от скорости и ширины лопасти (б)

Увеличение ширины лопастей ведет к увеличению критерия высоты сепарационной зоны, это влияние особенно заметно при высоких скоростях сырьевого потока до 20 м/с (критерий Вебера $4,58 \cdot 10^6$). Можно обратить внимание, наибольшие величины критериев наблюдается для скорости 15 м/с (критерий Вебера $2,57 \cdot 10^6$), причем для устройства с шириной лопасти 175 мм критерий высоты сепарационной зоны в 1,58 раз выше, чем для устройства с шириной лопасти 50 мм. При увеличении скорости подачи сырья выше 20 м/с значение критерия высоты сепарационной зоны резко снижаются. Ширина лопастей практически не влияет гидравлическое сопротивление.

Результаты расчетов исследования влияния расстояния между лопастями на работу устройства ввода сырья показаны на Рисунке 3.48.



а



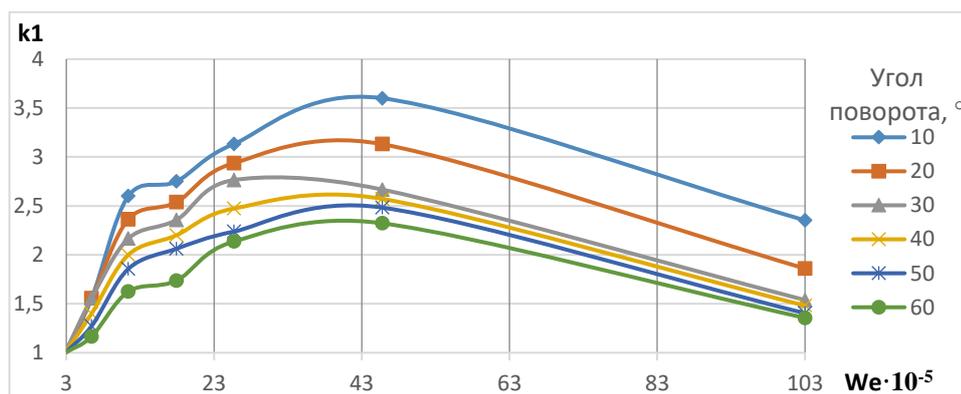
б

Рисунок 3.48 – Зависимость критерия высоты сепарационной зоны от критерия Вебера и расстояния между лопастями (а), гидравлического сопротивления от скорости и расстояния между лопастями (б)

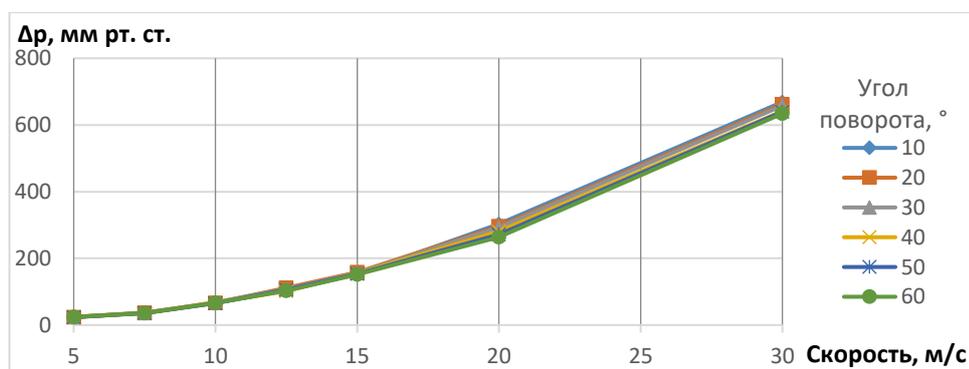
По результатам CFD-анализа обнаружено, что наибольшее значение критерия высоты сепарационной зоны наблюдается при расстоянии между лопастями 90 мм. Для скорости подачи сырья 20 м/с (значение критерия Вебера при этом $4,58 \cdot 10^6$) критерий высоты сепарационной зоны для устройства с расстоянием между лопастями 90 мм в 1,68 раза больше, чем для устройства с расстоянием между лопастями 243 мм. Максимальный критерий высоты сепарационной зоны достигается при скорости подачи сырья 20 м/с для любой ширины лопасти.

Из графиков видно, что увеличение расстояния между лопастями приводит к увеличению высоты сепарационной зоны в рассматриваемом диапазоне скоростей подачи сырья и практически не влияет на гидравлическое сопротивление.

Результаты расчетов исследования влияния угла поворота лопастей на работу устройства ввода сырья приведены на Рисунке 3.49.



а



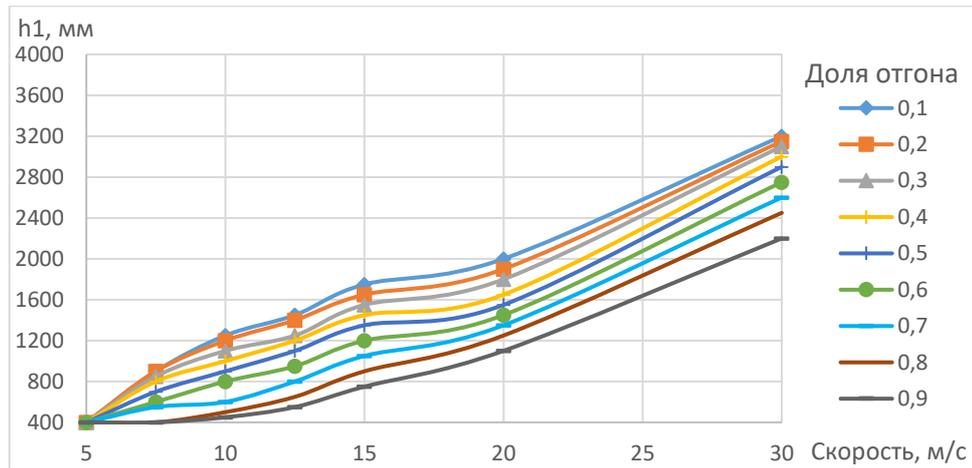
б

Рисунок 3.49 – Зависимость критерия высоты сепарационной зоны от критерия Вебера для потока сырья и угла поворота лопастей (а), гидравлического сопротивления от скорости и угла поворота лопастей (б)

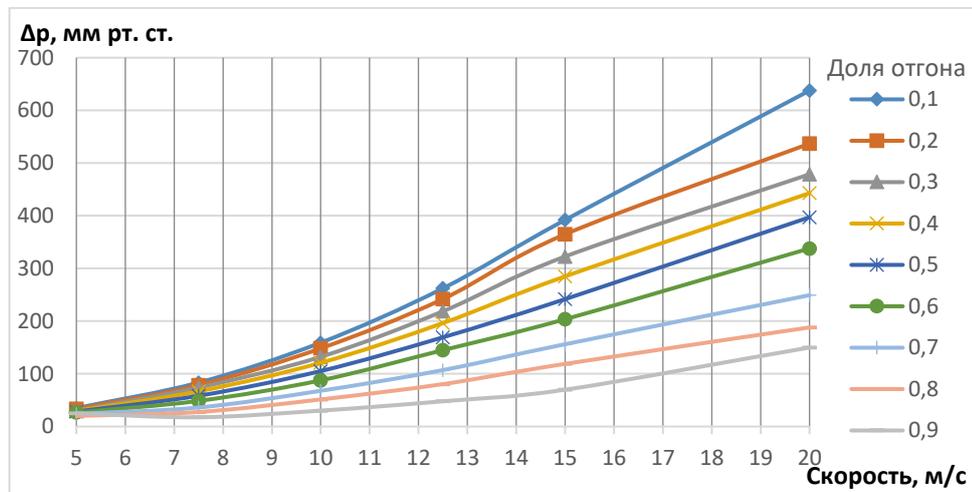
Из графика на Рисунке 3.49 видно, что увеличение угла поворота лопастей приводит к уменьшению показателя высоты сепарационной зоны в целом, при любых значениях скорости потока. При угле поворота 10° достигается максимальное значение критерия высоты сепарационной зоны. При скорости 20 м/с, критерий высоты сепарационной зоны для угла поворота лопастей 10° на 15% выше, чем для устройства с углом поворота лопастей 20° , и в 1,55 раз выше, чем для устройства с углом поворота лопастей 60° . Аналогично классическому лопастному устройству ввода сырья, рекомендуется устройство ввода с углом поворота лопастей 10° для работы с сырьем при высокой скорости подачи. Увеличение угла поворота лопастей приводит к увеличению высоты сепарационной зоны в целом, при любых значениях скорости потока, значительному увеличению высоты зоны распределения парового потока, также при любых значениях скорости потока, и незначительно влияет на гидравлическое сопротивление. Угол поворота лопасти практически не влияет на гидравлическое сопротивление.

Результаты расчетов исследования влияния доли отгона на работу устройства ввода сырья приведены на Рисунке 3.50.

Лопастные устройства ввода сырья при рассмотренных значениях доли отгона 0,1 – 0,9 могут разделить паровую и жидкую фазы непосредственно в устройстве ввода сырья при скорости подачи ниже 5 м/с. В целом, из графика на Рисунке 3.50 наблюдается следующая зависимость: чем выше доля отгона, тем ниже высота сепарационной зоны. Это можно объяснить малым содержанием жидкости в сырье, следовательно, меньшее количество жидкости необходимо отделить в устройстве ввода сырья. При скорости подачи сырья 12,5 м/с высота сепарационной зоны изменяется от 1450 мм (при доле отгона 0,1) до 550 мм (при доле отгона 0,9), т.е. уменьшается в 2,64 раза. При скорости подачи сырья 30 м/с высота сепарационной зоны изменяется от 3200 мм (при доле отгона 0,1) до 2200 мм при (доле отгона 0,9), т.е. уменьшается в 1,45 раз.



а



б

Рисунок 3.50 – Зависимость высоты сепарационной зоны (а) и гидравлического сопротивления (б) от скорости подачи и доли отгона сырьем

Как видно из Рисунка 3.50, гидравлическое сопротивление в устройстве ввода сырьем увеличивается с увеличением скорости подачи сырьем, по квадратичному закону, что соответствует уравнению Дарси-Вейсбаха. Чем выше доля отгона сырьем, тем ниже гидравлическое сопротивление. При низких долях отгона большое содержание жидкости в парожидкостном потоке, этим объясняется высокий перепад давления.

Так как вид зависимостей на графике носит параболический характер, проведена аппроксимация экспериментальных данных с применением квадратичного полинома [130], аналогично расчетам в главах 3.3, 3.4. В результате обработки результатов CFD-анализа получено следующее уравнение зависимости

критерия высоты сепарационной зоны от ширины лопасти и значения критерия Вебера:

$$k_{1\text{расч.}} = -0,00032We^2 + 0,0292We + 21,05718b^2 + 1,999b + 1,288 \quad (3.22)$$

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

b – ширина лопасти, м.

Для уравнения 3.22 среднее значение погрешности составило 7,02%.

Получено уравнение зависимости критерия высоты сепарационной зоны k_1 от критерия Вебера и расстояния между лопастями:

$$k_{1\text{расч.}} = -0,0005We^2 + 0,0511We + 77,1213r^2 - 29,7945r + 4,125 \quad (3.23)$$

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

r – расстояние между лопастями, м.

Для уравнения 3.23 среднее значение погрешности составило 5,23%.

Данные уравнения применимы 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.

Таким образом, проведено численное исследование влияния различных конструктивных (ширина лопасти, расстояние между лопастями, угол поворота лопастей) и технологических (доля отгона сырья) параметров на критерии высоты сепарационной зоны и зоны распределения двухканального V-образного лопастного устройства ввода сырья с тангенциальными элементами, его гидравлическое сопротивление. По результатам CFD-анализа отмечено:

- наибольшее значение критериев высоты сепарационной зоны и зоны распределения обнаружено для значения критерия Вебера $1,79 \cdot 10^6 - 4,58 \cdot 10^6$ что соответствует для исследуемой среды углеводородов C_1-C_4 скорости подачи сырья 12,5-20 м/с.

- к увеличению критерия высоты сепарационной зоны приводит увеличение ширины лопастей, при этом на гидравлическое сопротивление данный параметр не оказывает существенного влияния.

- к увеличению критерия высоты сепарационной зоны приводит уменьшение расстояния между лопастями, при этом на гидравлическое сопротивление данный параметр не оказывает существенного влияния.

- к увеличению критерия высоты сепарационной зоны приводит уменьшение угла поворота лопастей, при этом на гидравлическое сопротивление данный параметр не оказывает существенного влияния.

- при увеличении доли отгона сырья уменьшается высота сепарационной зоны и гидравлическое сопротивление.

- разработаны эмпирические уравнения: зависимости критерия высоты сепарационной зоны от критерия Вебера и ширины лопасти, зависимости критерия высоты сепарационной зоны от критерия Вебера и расстояния между лопастями.

3.3 Сравнительный анализ устройств ввода сырья

В результате работы проведено CFD-моделирование устройств ввода сырья отбойного типа, устройства ввода сырья лопастного типа классической одноканальной конструкции, а также новых конструкций лопастных устройств ввода сырья с двухканальной V-образной конструкцией без и с центробежными элементами. Для сравнения принято отбойное устройство по варианту 4, имеющее наименьшее значение высоты сепарационной зоны (наибольшее значение критерия сепарационной зоны). Сравнение приведено для варианта расчета на углеводородном сырье (C_1 - C_4) при доле отгона 0,73. Результаты сравнения высоты сепарационной зоны и соответствующего критерия приведены в Таблице 3.20, а также на Рисунке 3.51.

Для рассматриваемых условий наименьшая высота сепарационной зоны (наибольшее значение критерия высоты сепарационной зоны) при скорости подачи сырья от 7,5 до 15 м/с (значениях критерия Вебера от $6,43 \cdot 10^5$ до $2,57 \cdot 10^6$) у лопастного устройства ввода, при скорости подачи сырья от 20 до 30 м/с (значениях критерия Вебера от $4,58 \cdot 10^6$ до $1,03 \cdot 10^7$) для лопастного V-образного двухканального устройства ввода сырья с тангенциальными элементами.

Таблица 3.20 – Сравнительная таблица результатов расчета устройств ввода сырья (высота и критерий сепарационной зоны)

Скорость потока, м/с	Критерий Вебера $We \cdot 10^{-5}$	Отбойное устройство вариант 4	Одно-канальное лопастное устройство	Двухканальное V-образное лопастное устройство	Двухканальное V-образное лопастное устройство с тангенциальными элементами
Высота сепарационной зоны h_1 , мм					
5	2,86	400	400	400	400
7,5	6,43	550	400	450	400
10	11,4	750	400	700	550
12,5	17,9	900	500	850	650
15	25,7	1200	700	1150	850
20	45,8	2000	1800	1700	1350
30	103	3000	3200	2650	2600
Критерий высоты сепарационной зоны k_1					
5	2,86	1,00	1,00	1,00	1,00
7,5	6,43	1,27	1,75	1,56	1,75
10	11,4	1,73	3,25	1,86	2,36
12,5	17,9	1,83	3,30	1,94	2,54
15	25,7	1,92	3,36	2,04	2,76
20	45,8	1,80	2,00	2,11	2,67
30	103	1,33	1,25	1,51	1,54

При скорости подачи сырья от 7,5 до 15 м/с лопастное двухканальное V-образное устройство ввода сырья с тангенциальными элементами имеет высоту сепарационной зоны в 1,21 – 1,38 раз больше, чем одноканальное лопастное устройство ввода сырья, лопастное двухканальное V-образное устройство ввода сырья без тангенциальных элементов имеет высоту сепарационной зоны в 1,64 – 1,75 раз больше, чем одноканальное лопастное устройство ввода сырья. Отбойное устройство ввода имеет высоту сепарационной зоны в 1,71 – 1,88 раз больше, чем одноканальное лопастное устройство ввода сырья. При скорости подачи сырья от 20 до 30 м/с одноканальное лопастное устройство ввода сырья имеет высоту сепарационной зоны в 1,18 – 1,33 раз больше, чем лопастное двухканальное V-образное устройство ввода сырья с тангенциальными элементами, лопастное двухканальное V-образное устройство ввода сырья без тангенциальных элементов имеет высоту сепарационной зоны в 1,02 – 1,25 раз больше, чем лопастное

двухканальное V-образное устройство ввода с тангенциальными элементами. Отбойное устройство ввода имеет высоту сепарационной зоны в 1,38 – 1,71 раз больше при данных условиях.

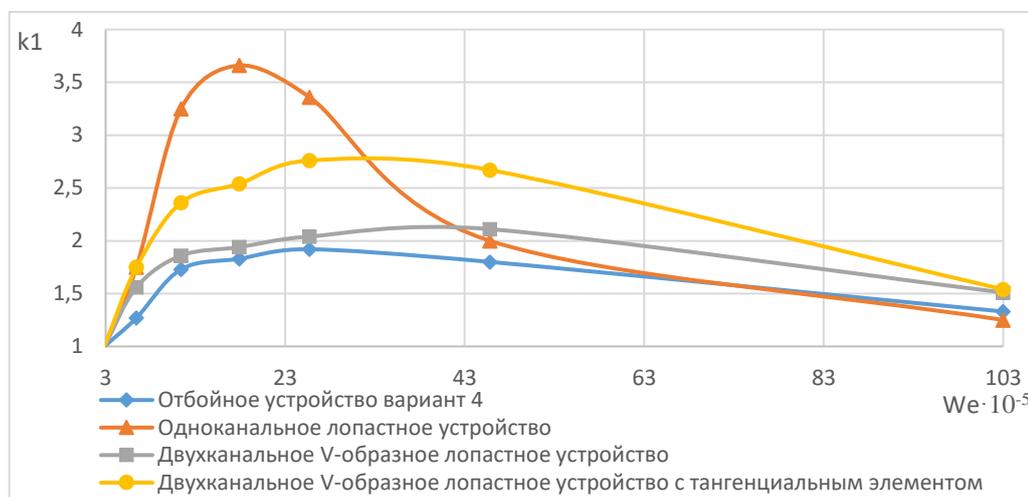


Рисунок 3.51 – Зависимость критерия высоты сепарационной зоны от критерия Вебера для разных устройств ввода сыра

Таким образом, с точки зрения достижения минимальной высоты сепарационной зоны, при скорости подачи сыра от 7,5 до 15 м/с (значениях критерия Вебера от $6,43 \cdot 10^5$ до $2,57 \cdot 10^6$) рекомендуется применение классического одноканального лопастного устройства ввода, при скорости подачи сыра от 20 до 30 м/с (значениях критерия Вебера от $4,58 \cdot 10^6$ до $2,86 \cdot 10^7$) рекомендуется применение лопастного двухканального V-образного устройства ввода сыра с тангенциальными элементами. Если скорость подачи сыра изменяется в широких пределах, имеет смысл использовать лопастное двухканальное V-образное устройство ввода сыра с тангенциальными элементами.

Результаты сравнения высоты зоны распределения и соответствующего критерия приведены в Таблице 3.21, а также на Рисунке 3.52.

Для рассматриваемых условий наименьшая высота зоны распределения (наибольшее значение критерия высоты зоны распределения) достигается при скорости подачи сыра 15 м/с (значение критерия Вебера $2,57 \cdot 10^6$) для всех лопастных устройств ввода сыра, наименьшая высота зоны распределения

(наибольшее значение критерия высоты зоны распределения) достигается при скорости подачи сырья 20-30 м/с (значение критерия Вебера $4,58 \cdot 10^6 - 1,03 \cdot 10^7$) для отбойного устройства ввода сырья.

Таблица 3.21 – Сравнительная таблица результатов расчета устройств ввода сырья (высота и критерий зоны распределения)

Скорость потока, м/с	Критерий Вебера $We \cdot 10^{-5}$	Отбойное устройство вариант 4	Одно-канальное лопастное устройство	Двухканальное V-образное лопастное устройство	Двухканальное V-образное лопастное устройство с тангенциальными элементами
Высота зоны распределения h_2 , мм					
5	2,86	4000	4000	4000	4000
7,5	6,43	4000	800	3850	3800
10	11,4	2400	750	3050	2900
12,5	17,9	1550	700	1650	1800
15	25,7	1300	650	2350	1050
20	45,8	1100	1700	1650	1350
30	103	1450	3150	2550	2500
Критерий высоты зоны распределения k_2					
5	2,86	1,00	1,00	1,00	1,00
7,5	6,43	1,00	4,56	1,04	1,05
10	11,4	1,52	4,67	1,20	1,26
12,5	17,9	2,26	5,07	1,71	1,94
15	25,7	2,73	5,54	2,09	2,58
20	45,8	3,27	2,35	2,18	2,67
30	103	2,76	1,27	1,57	1,60

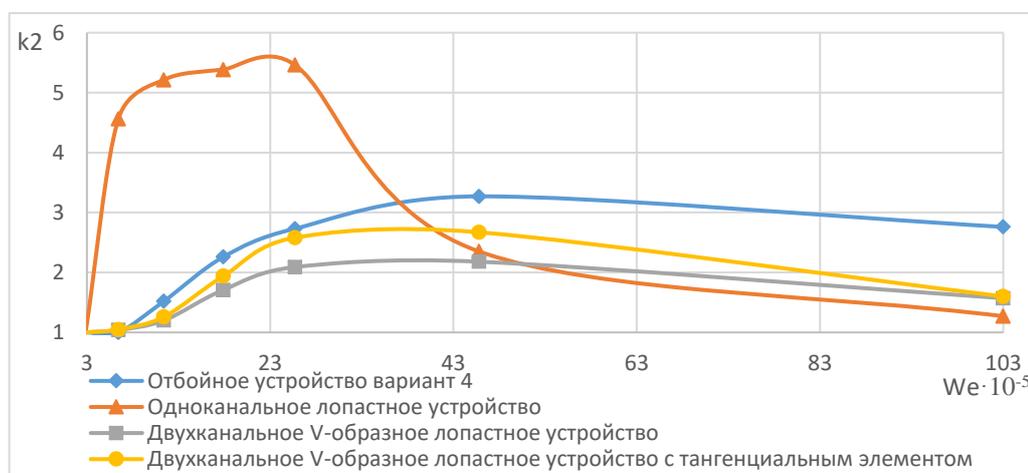


Рисунок 3.52 – Зависимость критерия высоты зоны распределения от критерия Вебера для разных устройств ввода сырья

Наибольшее значение критерия высоты зоны распределения при скорости 15 м/с (значение критерия Вебера $2,57 \cdot 10^6$) достигается для одноканального лопастного устройства ввода сырья, которое выше в 2,03, 2,65, 1,64 раз, чем отбойное устройство, двухканальное V-образное лопастное устройство, двухканальное V-образное лопастное устройство с тангенциальными элементами соответственно. При скорости подачи сырья 20-30 м/с наиболее высокий критерий высоты зоны распределения имеет отбойное устройство, критерий в 1,22-1,73 раз превышает аналогичный показатель двухканального V-образное лопастного устройства ввода сырья с тангенциальным элементом, который имеет наивысшее значение критерия среди лопастных устройств при данной скорости. С точки зрения достижения минимальной высоты зоны распределения, рекомендуется применение классического одноканального лопастного устройства ввода сырья для (значение критерия Вебера $2,57 \cdot 10^6$), и отбойного устройства при скорости подачи сырья 20-30 м/с (значение критерия Вебера $4,58 \cdot 10^6 - 1,03 \cdot 10^7$).

Таблица 3.22 – Сравнительная таблица результатов расчета устройств ввода сырья (гидравлическое сопротивление)

Вариант	Коэффициент сопротивления ξ .
Отбойное устройство вариант 4	1,813
Одноканальное лопастное устройство	1,320
Двухканальное V-образное лопастное устройство	1,374
Двухканальное V-образное лопастное устройство с тангенциальными элементами	1,236

Как видно из Таблицы 3.22, отбойное устройство имеет в 1,32-1,47 раз больший коэффициент сопротивления, чем лопастные устройства ввода сырья. Лопастные устройства ввода сырья имеют примерно похожие значения коэффициентов сопротивления, двухканальное V-образное лопастное устройство с тангенциальными элементами имеет минимальное значение коэффициента.

Таким образом, при скорости 7,5-15 м/с (значениях критерия Вебера от $6,43 \cdot 10^5$ до $4,58 \cdot 10^6$) в целом предпочтительно применение классического одноканального лопастного устройства ввода сырья, для достижения минимальных

значений высот сепарационной зоны и зоны распределения, при скорости 20-30 м/с (значениях критерия Вебера от $4,58 \cdot 10^6$ до $1,03 \cdot 10^7$) предпочтительно применение двухканального V-образного лопастного устройства с тангенциальными элементами для достижения минимальных значений высоты сепарационной зоны и гидравлического сопротивления.

Выводы по главе 3

По результатам исследований устройств ввода сырья на примере колонны фракционирования смеси легких углеводородов, обнаружено следующее:

- унос жидкости в зоне ввода сырья в ректификационную колонну увеличивает энергозатраты процесса разделения, для различных сред и условий разделения в ректификационной колонне. Чем меньше контактных устройств содержит колонна, тем большее влияние на энергозатраты процесса ректификации оказывает эффективность работы устройства ввода сырья;

- при скорости подачи сырья 5 м/с (критерий Вебера $2,86 \cdot 10^5$) и менее применение специальных устройств ввода сырья не требуется;

- при скорости от 7,5 м/с до 30 м/с (критерий Вебера $6,43 \cdot 10^5$ – $1,03 \cdot 10^7$) отбойные устройства ввода сырья обеспечивают сепарацию входящего потока на паровую и жидкую фазы при небольшом гидравлическом сопротивлении, с критерием высоты сепарационной зоны 1,08-1,92. Наиболее высокое значение критерия высоты сепарационной зоны достигается при скорости 15 м/с (критерий Вебера $2,57 \cdot 10^6$), и составляет 1,92 для наиболее эффективного устройства по варианту 4. Определены коэффициенты сопротивлений данных устройств;

- одноканальное лопастное устройство ввода сырья обеспечивает более эффективное разделение входящего потока на паровую и жидкую фазы, чем отбойные устройства, а также более равномерное распределение парового потока по сечению колонны: с критерием высоты сепарационной зоны в 1,75 раза больше и критерием высоты зоны распределения в 2,03 раз больше при скорости подачи сырья 15 м/с (критерий Вебера $2,57 \cdot 10^6$), чем у отбойных устройств;

- двухканальное V-образное лопастное устройство ввода сырья также обеспечивает более эффективное разделение входящего потока на паровую и жидкую фазы, чем отбойные устройства, в некоторых случаях данное устройство имеет меньшую высоту сепарационной зоны, чем лопастное устройство ввода. Распределение парового потока при этом менее равномерное, а гидравлическое сопротивление больше;

- двухканальное V-образное лопастное устройство ввода сырья с тангенциальными элементами обеспечивает эффективную сепарацию парожидкостного потока сырья при высоких скоростях подачи сырья 20-30 м/с (критерий Вебера $4,58 \cdot 10^6 - 1,03 \cdot 10^7$), критерий высоты сепарационной зоны при этом выше в 1,02 – 1,25 раз, чем для лопастного устройства ввода сырья. Гидравлическое сопротивление этого устройства ввода сырья минимальное, среди рассмотренных в работе конструкций;

- для всех видов лопастных устройств ввода сырья получены эмпирические зависимости критерия высоты сепарационной зоны от: ширины лопастей и значения критерия Вебера, расстояния между лопастями и значения критерия Вебера. 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;

- для всех рассмотренных устройств ввода сырья наблюдалась следующая зависимость от доли отгона: чем выше доля отгона, тем ниже высота сепарационной зоны и ниже гидравлическое сопротивление;

- при скорости подачи сырья 7,5-15 м/с (значениях критерия Вебера от $6,43 \cdot 10^5$ до $4,58 \cdot 10^6$) в целом предпочтительно применение классического одноканального лопастного устройства ввода сырья, для достижения минимальных значений высот сепарационной зоны и зоны распределения, при скорости 20-30 м/с (значениях критерия Вебера от $4,58 \cdot 10^6$ до $1,03 \cdot 10^7$) предпочтительно применение двухканального V-образного лопастного устройства с тангенциальными элементами для достижения минимальных значений высоты сепарационной зоны и гидравлического сопротивления.

Глава 4 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ НАСАДОЧНЫХ КАПЛЕОТБОЙНЫХ УСТРОЙСТВ

В данной главе проведено исследование гидродинамики насадочных каплеотбойных устройств для сепараторов и массообменных колонн. Целью данных устройств является исключение уноса капель жидкой фазы газовым потоком в сепараторе либо в ректификационной колонне. Особенно серьезную роль каплеотбойники играют в сепараторах, в которых происходит однократное разделение потоков пара и жидкости. Примером могут являться газовые сепараторы на установках подготовки газа к транспортировке, для которых в настоящее время наблюдается тенденция по снижению капельного уноса жидкости с газом.

Каплеотбойник представляет собой блок насадки, выполняемый из просечно-вытяжного листа, сетки или гофры (преимущественно сетки и ПВХ). В зависимости от газовой нагрузки и содержания в сырьевом газе капельной жидкости и механических примесей, применяется противоточная (горизонтальная) или перекрестноточная (вертикальная) конфигурация каплеотбойника. Причем в случае перекрестноточной конфигурации каплеотбойника можно изменять количество и геометрические размеры блоков, а также использовать несколько ступеней сепарации. Для случаев с особо высокой газовой нагрузкой могут применяться специальные конструкции расположения блоков насадок.

Расчеты методом CFD-анализа показали, что перекрестноточный одноступенчатый каплеотбойник имеет в 2 раза более широкий диапазон работы, при котором отсутствует каплеунос жидкой фазы, по сравнению с противоточным каплеотбойным насадочным устройством.

По результатам промышленных внедрений насадочных каплеотбойных устройств с последующим определением капельного уноса жидкости с газом сепарации было установлено, что перекрестноточные насадочные каплеотбойники обладают высокой эффективностью и обеспечивают практически полное отделение капельной жидкости от выходящего потока газа [66,137,138].

4.1 Экспериментальное исследование перекрестноточного насадочного каплеотбойника

Проведены исследования перекрестноточного насадочного каплеотбойника, исследовалась зависимость наличия капельного уноса на выходе из каплеотбойника от скорости подачи потока газа. Рабочая среда – воздух, в который подается вода в капельном виде в количестве 110-300 мг/м³. Размеры насадки: высота слоя 0,60 м, длина полосы 0,50 м, ширина 0,10 м. Сечение прохода 0,30 м². Сечение в окнах 0,087 м². Удельная поверхность насадки 520 м²/м³.

Каплеотбойник данного типа может применяться сепараторах и в колоннах с целью предотвращения каплеуноса. Преимущества вертикальных каплеотбойников: возможность увеличения сечения для прохода, превышающего поперечное сечение аппарата, возможность варьирования площади сечения для прохода пара путем выбора количества полос и размеров каплеотбойных устройств, в данном плане есть сходство с перекрестноточными насадочными контактными устройствами [136]. Экспериментальные данные приведены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Экспериментальные данные исследования перекрестноточного каплеотбойного устройства

Расход воздуха, м ³ /ч	Температура воздуха, °С	Наличие уноса	Перепад давления, Па
2600	32,0	отсутствие	121,52
3000	34,0	отсутствие	179,85
3400	34,7	отсутствие	243,04
3800	34,7	отсутствие	291,65
4200	34,8	отсутствие	349,98
4600	34,7	наличие	403,45
4800	32,7	наличие	437,47
5000	34,9	наличие	476,36
5400	34,9	наличие	549,27
5800	34,0	наличие	631,91
6200	34,8	наличие	704,82
6700	33,1	наличие	777,73

Фотографии стенда при различных газовых нагрузках приведены на Рисунках 4.1 – 4.3.



Рисунок 4.1 – Вид стенда при расходе газа 3400 м³/ч

На Рисунке 4.1 можно наблюдать работу насадочного перекрестноточного каплеотбойника при расходе воздуха 3400 м³/ч. Смесь воздуха и капель воды подается в правую часть стенда, отсепарированный воздух выходит в левой части стенда. В правой части стенда можно наблюдать скопление капель жидкости на верхней и боковой стенках аппарата. Частично жидкость присутствует непосредственно на насадке. В левой части аппарата следов капель жидкости не обнаруживается. В связи с чем можно сделать вывод, что каплеотбойник полностью отбивает капельную жидкость, унос отсутствует.



Рисунок 4.2 – Вид стенда при расходе газа 4200 м³/ч

На Рисунке 4.2 можно наблюдать работу насадочного перекрестноточного каплеотбойника при расходе воздуха $4200 \text{ м}^3/\text{ч}$. В правой части стенда можно наблюдать скопление капель жидкости на верхней и боковой стенках аппарата, причем видно, что количество капель жидкости больше, чем при работе стенда с расходом воздуха $3400 \text{ м}^3/\text{ч}$. В левой части аппарата следов капель жидкости не обнаруживается. В связи с чем можно сделать вывод, что каплеотбойник полностью отбивает капельную жидкость, унос отсутствует.

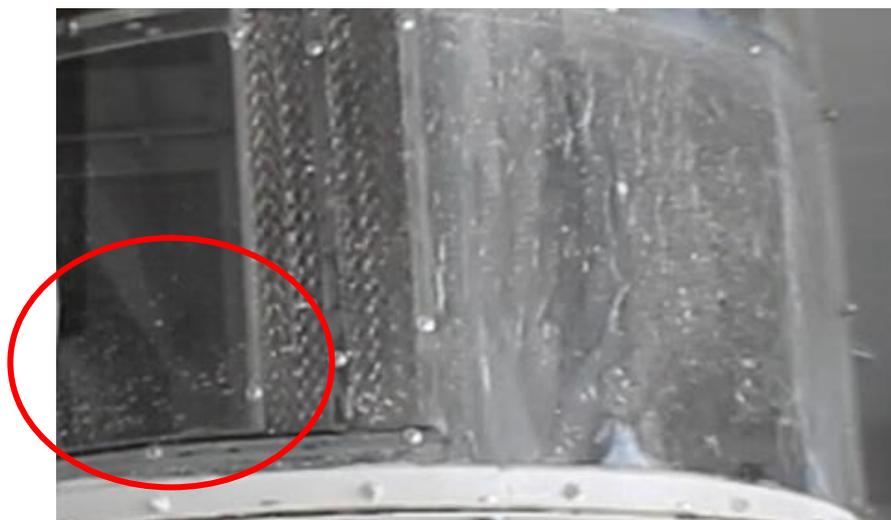


Рисунок 4.3 – Вид стенда при расходе газа $4600 \text{ м}^3/\text{ч}$

На Рисунке 4.3 можно наблюдать работу насадочного перекрестноточного каплеотбойника при расходе воздуха $4600 \text{ м}^3/\text{ч}$. В правой части стенда количество капель жидкости еще больше, чем при режиме работы на расход воздуха $4200 \text{ м}^3/\text{ч}$. В левой части стенда видны капли жидкости на стенках устройства, что говорит о том, что произошел унос капельной жидкости через каплеотбойник. При больших нагрузках по газу унос жидкости сохранялся. Одним из способов предотвращения капельного уноса при таких высоких газовых нагрузках является размещение дополнительного слоя вертикального перекрестноточного насадочного каплеотбойника [66].

Традиционно для насадочных устройств удельная паровая нагрузка измеряется с применением F-фактора, вычисляемого по формуле 4.1 [139]:

$$F = \frac{V}{S} \sqrt{\rho} \quad (4.1)$$

- где F – значение F-фактора, $\text{Па}^{0,5}$;
 V – объемный расход пара, $\text{м}^3/\text{с}$;
 S – сечение для прохода пара, м^2 ;
 ρ – плотность пара, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Данная формула применима и для насадочных каплеотбойных устройств. Результаты расчетов приведены в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Расчетные данные исследования перекрестноточного каплеотбойного устройства

Содержание воды на входе, $\text{мг}/\text{м}^3$	F-фактор на сечение слоя, $\text{Па}^{0,5}$	F-фактор в окнах, $\text{Па}^{0,5}$	Наличие уноса	Перепад давления, Па	Перепад давления на метр ширины насадки, $\text{Па}/\text{м}$
300,00	2,59	8,94	отсутствие	121,52	1215,2
260,00	2,98	10,28	отсутствие	179,85	1798,5
230,00	3,37	11,63	отсутствие	243,04	2430,4
200,00	3,77	13,00	отсутствие	291,65	2916,5
190,00	4,17	14,37	отсутствие	349,98	3499,8
170,00	4,56	15,74	наличие	403,45	4034,5
160,00	4,78	16,48	наличие	437,47	4374,7
150,00	4,96	17,10	наличие	476,36	4763,6
140,00	5,36	18,47	наличие	549,27	5492,7
130,00	5,76	19,87	наличие	631,91	6319,1
120,00	6,15	21,21	наличие	704,82	7048,2
110,00	6,67	22,99	наличие	777,73	7777,3

Как видно из Таблицы 4.2, перекрестноточное однополосное насадочное каплеотбойное устройство обеспечивает отсутствие каплеуноса при нагрузках по газу до $4,17 \text{ Па}^{0,5}$.

Высокая эффективность насадочных устройств подтверждается результатами промышленных внедрений данного типа каплеотбойников [66,137,138].

4.2 CFD-анализ противоточного и перекрестноточного насадочного каплеотбойника

Далее приведены результаты CFD-анализа насадочных каплеотбойных устройств. Целью исследования является сравнение противоточного и перекрестноточного типов каплеотбойных устройств, определения их диапазона работы по скорости потока газа, в котором достигается отсутствие каплеуноса.

На первом этапе для проверки адекватности расчета перекрестноточного каплеотбойника методами CFD-анализа было выполнено моделирование в режиме работы, приведенном в главе 4.1. Расчет в ANSYS CFX, проводился согласно модели турбулентности потока k - ε . Расчетная сетка квадратичной формы, размер элемента сетки 1 мм, что необходимо для правильного и адекватного расчета гидродинамических явлений в пограничном слое возле элементов насадки. Количество элементов сетки на модель: 4,5 миллиона. Размер элемента каплеотбойника: 50x50x150 мм, разработанная 3D-модель насадочного устройства, приведенная на Рисунке 4.4, соответствует реальной насадке с удельной поверхностью 520 м²/м³.

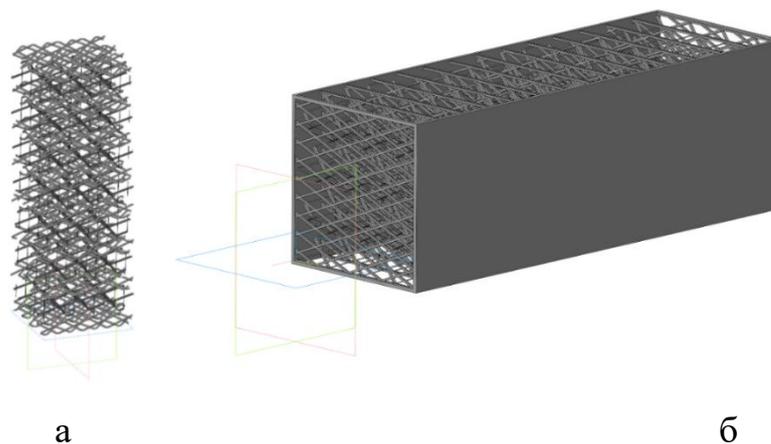


Рисунок 4.4 – 3D-модели элемента противоточного (а) и перекрестноточного (б) насадочного каплеотбойника

Граничные условия расчета: относительный перепад давления на выходе из элемента каплеотбойника равен 0 Па, на входе в элемент задается средняя скорость

входящего потока (сечение моделируемого аппарата сохраняется на всем пути газа, без учета места, занимаемого насадкой). В результате CFD-анализа рассчитываются скорости каждой фазы по объему колонны, концентрации фаз, распределение давления в объеме колонны, в частности, рассчитывается давление на входе в объем для расчета гидравлического сопротивления каплеотбойника. Расчетная модель перекрестноточного каплеотбойного устройства в ANSYS CFX приведена на Рисунке 2.3.

Результаты расчетов приведены в Таблице 4.3. Распределение потока жидкости показано на Рисунке 4.5.

Таблица 4.3 – Результаты CFD-анализа перекрестноточного каплеотбойника на системе воздух-вода

Содержание воды на входе, мг/м ³	F-фактор на сечение слоя, Па ^{0,5}	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

Сравнивая результаты по Таблицам 4.2, 4.3, можно сделать вывод, что разрабатываемая нами модель является адекватной.

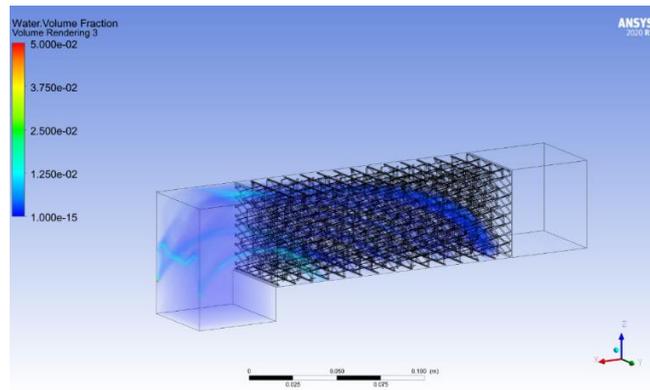


Рисунок 4.5 – Распределение потока воды в перекрестноточном насадочном каплеотбойнике при $F = 4,17 \text{ Па}^{0,5}$

На Рисунке 4.5 видно распределение жидкой фазы в объеме элемента каплеотбойного устройства. Можно отметить, что при повороте потока газа от области входа в устройство к самому каплеотбойнику происходит первичная сепарация жидкой фазы от паровой вследствие воздействия инерционных сил. В результате этого можно наблюдать скопление жидкой фазы на верхней и боковых стенках каплеотбойника. Подобные явления наблюдались и во время испытаний на стенде, что видно из Рисунка 4.6.



Рисунок 4.6 – Капельная жидкость на стенке стенда по исследованию насадочных каплеотбойных устройств

Жидкость, по ходу каплеотбойного устройства, направляется вниз каплеотбойника под действием сил инерции, возникающих при ударе капель жидкости об элемент насадки, и под действием сил тяжести. Жидкость не попадает

за пределы каплеотбойного устройства, что позволяет сделать вывод о том, что унос жидкости отсутствует.

На следующем этапе произведено моделирование работы противоточного и перекрестноточного одноступенчатого насадочного каплеотбойника. В качестве среды выбрана смесь легких углеводородов: метан, этан. Жидкая фаза представлена пропаном и бутаном, таким образом моделируется процесс низкотемпературной сепарации. Актуальность моделирования каплеотбойных устройств для этих условий была подробно описана в главе 1.3, в частности, согласно работы [80]. Содержание жидкой фазы принято 1 % об. Результаты расчетов приведены в Таблицах 4.4, 4.5 для противоточного и перекрестноточного одноступенчатого насадочного каплеотбойника соответственно.

Таблица 4.4 – Результаты CFD-анализа противоточного насадочного каплеотбойника в среде легких углеводородов

F-фактор на сечение слоя, Па ^{0,5}	Наличие уноса	Перепад давления, Па	Перепад давления на метр высоты насадки, Па/м
0,5	отсутствие	124,2	828,00
1,0	отсутствие	142,4	949,33
1,5	отсутствие	236,2	1574,67
2,0	отсутствие	245,5	1636,67
2,1	отсутствие	245,7	1638,00
2,2	наличие	249,4	1662,67
2,3	наличие	257,3	1715,33
2,4	наличие	261,1	1740,67
2,5	наличие	272,1	1814,00
3,0	наличие	371,7	2478,00

Как видно из результатов расчета, противоточный насадочный каплеотбойник обеспечивает отсутствие уноса жидкости при F-факторе по газу до 2,1 Па^{0,5}. При увеличении скорости подачи газа увеличивается гидравлическое сопротивление каплеотбойника. В целом характер зависимости гидравлического сопротивления каплеотбойника соответствует уравнению Дарси-Вейсбаха, однако при $F = 1,5 \text{ Па}^{0,5}$ наблюдается скачкообразное увеличение гидравлического

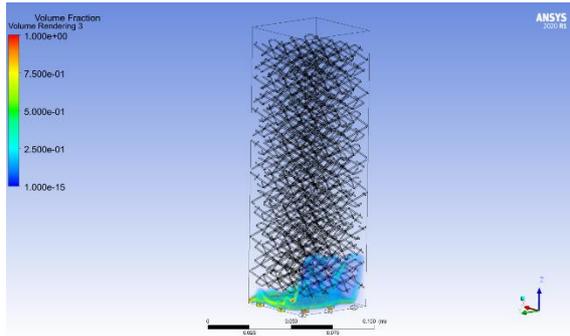
сопротивления. Это может быть связано с повышением высоты смоченного жидкой фазой слоя насадки при увеличении скорости подачи газа.

Таблица 4.5 – Результаты CFD-анализа перекрестноточного насадочного каплеотбойника в среде легких углеводородов

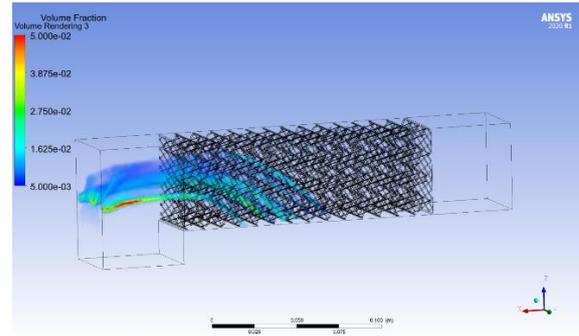
F-фактор на сечение слоя, Па ^{0,5}	Наличие уноса	Перепад давления, Па	Перепад давления на метр ширины насадки, Па/м
0,5	отсутствие	69,0	460,00
1,0	отсутствие	90,6	604,00
1,5	отсутствие	124,1	827,33
2,0	отсутствие	155,0	1033,33
2,5	отсутствие	198,9	1326,00
3,0	отсутствие	239,2	1594,67
3,5	отсутствие	321,7	2144,67
4,0	отсутствие	418,4	2789,33
4,1	отсутствие	439,3	2928,67
4,2	отсутствие	460,8	3072,00
4,3	наличие	482,9	3219,33
4,4	наличие	505,4	3369,33
4,5	наличие	528,5	3523,33
5,0	наличие	652,1	4347,33

Таким образом, видно, что перекрестноточный каплеотбойник позволяет производить отделение капель жидкой фазы от парового потока в большем диапазоне скоростей. Для противоточного каплеотбойника диапазон удельной нагрузки по газу составляет от 0 до 2,1 Па^{0,5}, для перекрестноточного каплеотбойника она составляет от 0 до 4,2 Па^{0,5}, при этом моделирование проводилось только для одноступенчатого варианта. Низкий диапазон работы противоточного каплеотбойника может объясняться явлениями вторичного каплеуноса, при котором отбитые капли жидкости подхватываются восходящим потоком газа и направляются вверх. Конструкция перекрестноточного каплеотбойника исключает это явление, так как отбитая жидкость перетекает в куб сепаратора или на верхнее контактное устройство колонны через переливные

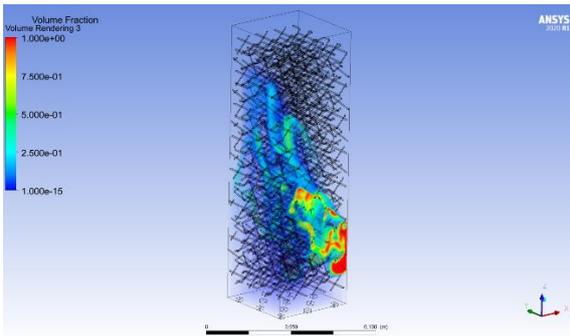
трубы, не контактируя со встречным потоком газа. В этой же связи гидравлическое сопротивление перекрестноточного каплеотбойника ниже, чем у горизонтального. Например, при $F = 1,0 \text{ Па}^{0,5}$ этот показатель отличается в 1,57 раз [140]. Гидравлическое сопротивление перекрестноточного каплеотбойника увеличивается при увеличении скорости подачи газа, зависимость соответствует уравнению Дарси-Вейсбаха.



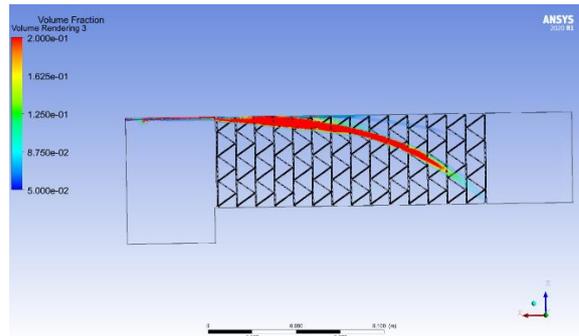
$$F = 1,0 \text{ Па}^{0,5}$$



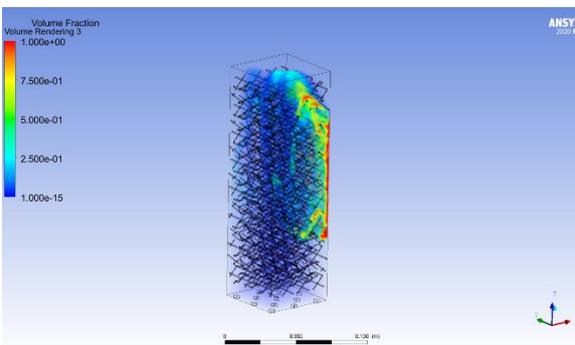
$$F = 1,0 \text{ Па}^{0,5}$$



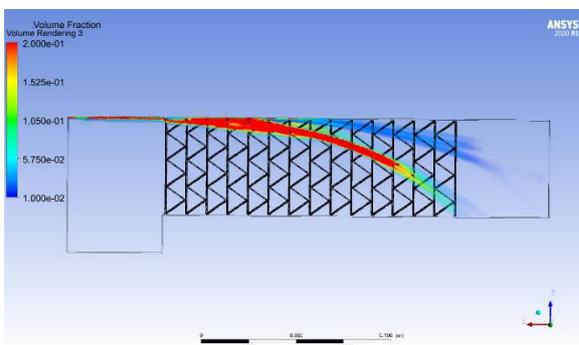
$$F = 2,1 \text{ Па}^{0,5}$$



$$F = 4,2 \text{ Па}^{0,5}$$



$$F = 2,2 \text{ Па}^{0,5}$$



$$F = 4,3 \text{ Па}^{0,5}$$

Противоточный каплеотбойник

Перекрестноточный каплеотбойник

Рисунок 4.7 – Распределение потока жидкой фазы в насадочном каплеотбойнике в среде легких углеводородов C_1-C_4

На Рисунке 4.7 показано распределение жидкости по объему насадочного каплеотбойника противоточного и перекрестноточного типов, при разных скоростях подачи газа. При низкой скорости подачи газа, соответствующей $F=1,0 \text{ Па}^{0,5}$, видно, что капли жидкости не достигают места выхода потока газа для обоих вариантов каплеотбойника. В противоточном каплеотбойнике капли жидкости отбиваются в нижней части насадки. В перекрестноточном каплеотбойнике жидкость отбивается в начальной области насадки, проходя не больше половины ширины слоя.

Для противоточного каплеотбойника при увеличении скорости подачи газа до показателя $F=2,1 \text{ Па}^{0,5}$ можно наблюдать увеличение высоты смоченного жидкой фазой слоя насадки, т.е. жидкость поднимается почти до верхней кромки слоя насадки. Однако, капли жидкости не достигают области выхода потока газа, таким образом, жидкость полностью отбивается в верхней части насадки. Кроме этого, можно отметить, что капельная жидкость распределяется неравномерно, имеются области повышенной концентрации жидкости около стенок отбойника. При дальнейшем увеличении скорости подачи газа до показателя $F=2,2 \text{ Па}^{0,5}$ капельная жидкость попадает в выходящий поток газа, что говорит о том, что при данной нагрузке каплеотбойник не обеспечивает полную сепарацию газа от жидкой фазы. Повышенная концентрация жидкой фазы у стенок каплеотбойника также наблюдается.

Для перекрестноточного каплеотбойника на Рисунке 4.8 представлены результаты для скоростей газа, соответствующих $F=4,2 \text{ Па}^{0,5}$ и $F=4,3 \text{ Па}^{0,5}$. При $F=4,2 \text{ Па}^{0,5}$ жидкость отбивается в каплеотбойнике и не попадает в сечение на выходе каплеотбойника, при $F=4,3 \text{ Па}^{0,5}$ видно наличие небольшого количества жидкости после каплеотбойника, что говорит о том, что при данной нагрузке каплеотбойник не обеспечивает полную сепарацию газа от жидкой фазы.

На основе результатов исследований была разработана Методика по определению капельного уноса жидкости с газом сепарации, а также разработана программа для ЭВМ «Расчет насадочного каплеотбойника для вертикальных газовых сепараторов с известным диаметром» [141].

Выводы по главе 4

В результате проведенных экспериментальных исследований вертикального каплеотбойного насадочного устройства на среде воздух – вода установлены пределы его работы: перекрестноточный одноступенчатый однополосный блок насадки обеспечивает полное отделение капельной жидкости при значении удельных паровых нагрузок (F-фактор) до $4,17 \text{ Па}^{0,5}$.

Проведена оценка адекватности расчётной модели вертикального каплеотбойника на системе воздух – вода в среде ANSYS и установлена адекватность численной модели при сравнении с экспериментальными данными.

В результате исследований, осуществлённых методом CFD-моделирования, проведён сравнительный анализ, который позволил оценить диапазоны работы противоточного и перекрестноточного одноступенчатого насадочного каплеотбойного устройства. Установлен диапазон удельной нагрузки по газу для противоточного каплеотбойника: от 0 до $2,1 \text{ Па}^{0,5}$, для перекрестноточного каплеотбойника: от 0 до $4,2 \text{ Па}^{0,5}$. Перекрестноточный одноступенчатый каплеотбойник имеет более широкий диапазон работы.

Гидравлическое сопротивление противоточного каплеотбойника при удельных нагрузках от $0,5$ до $3,0 \text{ Па}^{0,5}$ находится в пределах $124,2 - 371,7 \text{ Па}$, для перекрестноточного одноступенчатого каплеотбойника $69,0 - 239,2 \text{ Па}$, то есть меньше в $1,3 - 1,8$ раз.

Результаты моделирования с оценкой диапазона эффективной работы в среде воздух-вода подтверждены расчётными исследованиями в среде легких углеводородов.

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^{0,5}, для перекрестноточного каплеотбойника она составляет от 0 до 4,2 Па^{0,5}. 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».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мановян, А.К. Технология первичной переработки нефти и природного газа – уч. для вузов / А.К. Мановян. – М.: Химия, 2001. – 568 с.
2. Александров, И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования / И.А. Александров. – М.: Химия, 1978. – 280 с.
3. Каспарьянц, К.С. Процессы и аппараты для объектов промышленной подготовки нефти и газа / К.С. Каспарьянц, В.И. Кузин, Л.Г. Григорян. – М.: Недра, 1977. – 254 с.
4. Аджиев, А.Ю. Подготовка и переработка попутного нефтяного газа в России. Ч.1 / А.Ю. Аджиев, П.А. Пуртов. – Краснодар: ЭДВИ. - 2014. – 776 с.
5. Аджиев, А.Ю. Подготовка и переработка попутного нефтяного газа в России. Ч.2 / А.Ю. Аджиев, П.А. Пуртов. – Краснодар: ЭДВИ. - 2014. – 508 с.
6. Mark Bothamley, Gas/Liquid Separators: Quantifying Separation Performance – Part 1 / Mark Bothamley, John M. Campbell (Petroskills) // Society of Petroleum Engineers. Oil and Gas Facilities, 2015. – Vol. 2(04). – P. 21-29.
7. [The new Schoepentoeter Plus](http://www.sulzer.com/ro/-/media/Documents/Cross_Division/STR/2010/STR_2010_3_06_Mosca_en_low.pdf) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.sulzer.com/ro/-/media/Documents/Cross_Division/STR/2010/STR_2010_3_06_Mosca_en_low.pdf – Заглавие с экрана. – (Дата обращения 24.09.2019).
8. Пат. 8070141 Соединенные Штаты Америки, МПК С10J 1/08. Fluid inlet device, use, and method or retrofitting / Kooyman H.A., Nooijen J.L.; заявитель и патентообладатель Shell Oil Company, Houston, TX (US). – 12/097,925, заявл. 21.11.2006; опубл. 06.12.2011.
9. Пат. 7488361 Соединенные Штаты Америки, МПК В01D 50/00. Inlet and distribution device / Larnholm P.R.; заявитель и патентообладатель FMC Technologies C.V. (NL). – 10/569,091, заявл. 20.04.2004; опубл. 10.02.2009.
10. [Брошюра компании OMEGA Separations](http://omegaseparations.com/omegaseparations/media/pdfs/OMEGA-Brochure-2010-online.pdf) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://omegaseparations.com/omegaseparations/media/pdfs/OMEGA-Brochure-2010-online.pdf> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения 24.09.2019).

11. Cusack R. Rethink your liquid-liquid separations. / R. Cusack // Hydrocarbon Processing, 2009. – №6. – P. 53-60.
12. Пат. 2339422 Российская Федерация, МПК В01D 3/00. Устройство для подачи потока текучей среды для массообменной колонны / Лэрд Д.Г., Шнеппер К.А., Эндер К.; заявитель и патентообладатель Кох-Глич, ЛП (US). – 2006101903/15, заявл. 06.08.2004; опубл. 27.11.2008, Бюл. №33.
13. Viteri, R. Innovative gas-liquid separator increases gas production in the North Sea / R. Viteri, D. Egger , H. Polderman // The 85th GPA Annual Convention. – 2006. – P. 40.
14. Wehrli, M. Mixed phase feeds in mass transfer columns and liquid separation/ M. Wehrli, P. Schaeffer, U. Marti, F. Muggli, H. Kooijman // I. Chem. E. Distillation & Absorption, London, Sept 2006.
15. Пат. 2397001 Российская Федерация, МПК В01D 3/00, В01D 3/32. Входное устройство для текучей среды, его использование и способ модернизации / Коэйман Х.А.; заявитель и патентообладатель Шелл Интернэшнл Рисерч Маатсхаппий Б.В. (NL). – 2007147206/15, заявл. 16.05.2006; опубл. 20.08.2010, Бюл. № 23.
16. Пат. 2424032 Российская Федерация, МПК В01D 3/00. Устройство впуска жидкости, его применение и способ модернизации таких устройств / Коэйман Х.А., Ноэijen Й.Л.; заявитель и патентообладатель Шелл Интернэшнл Рисерч Маатсхаппий Б.В. (NL). – 2008129700/04, заявл. 21.11.2006; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20.
17. Пат. 2329849 Российская Федерация, МПК В01D 3/00, В01D 3/32. Газораспределительное устройство для массообменных аппаратов / Фарахов М.И., Салимгареев И.Б., Шигапов И.М., Ахлямов М.Н., Хасанов Р.М., Асибаков Л.И.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-внедренческий центр «Инжехим» (RU). – 2006144005/15, заявл. 01.12.2006; опубл. 27.07.2008, Бюл. № 21.
18. Пат. 2394623 Российская Федерация, МПК В01D 3/00, В01D 3/32. Газораспределительное устройство / Минликаев В.З., Фарахов М.И., Ахлямов

М.Н., Байгузин Ф.А., Нигматов Р.Р., Андреев О.П., Салихов З.С., Минигулов Р.М., Коротников Р.В., Яхонтов Д.А., Саньков А.З., Корякин А.Ю.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-внедренческий центр «Инжехим» (RU), ООО «Газпром добыча Ямбург» (RU). – 2009102905/15, заявл. 29.01.2009; опубл. 20.07.2010, Бюл. № 20.

19. ЗАО ПИРО. Поставляемая продукция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zaopiro.ru/production.html>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения 20.02.2020).

20. Пат. 10599 Российская Федерация, МПК В01D 53/18. Узел ввода сырья теплообменного аппарата / Пильч Л.М., Сидоров И.Б., Семенистый М.Ю., Илларионов А.Ю., Веснин Р.В., Колмогоров Г.Ю., Галихин А.П., Каштанов А.П., Максимов С.В.; заявитель и патентообладатель Пильч Л.М. – 99105539/20, заявл. 17.03.1999; опубл. 16.08.1999.

21. Чуракова С.К. Расчет процесса и аппаратного 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.

22. Совершенствование эжекторных аппаратов и разработка устройств ввода сырья в колонну для процессов нефтепереработки: специальность 05.04.09 «Машины и агрегаты нефтеперерабатывающих и химических производств»: дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / Хайрудинова Сахия Сахиуллиновна; ФГБОУ ВО УГНТУ. – Уфа, 2000. – 142 с.

23. А.с. 1498538 СССР, МПК В01D 45/12. Сепарирующее устройство / Ибрагимов И.Г., Кузеев И.Р., Филимонов Е.А., Хайрудинова С.С.; заявитель Уфимский нефтяной институт. – 4292113/31-26, заявл. 30.07.1987; опубл. 07.08.1989, Бюл. №29.

24. Yuan, X., The influence of various gas inlets on gas distribution in packed columns / X. Yuan, W. Li // Institution of Chemical Engineers Symposium Series, 1997. – Vol. 142. – P. 931-938.

25. Пат. 2173200 Российская Федерация, МПК В01D 3/00, В01D 53/18. Способ подачи среды в устройство, в частности в колонну, и колонна для осуществления способа / Мозер Ф.; заявитель и патентообладатель Зульцер Хетех АГ (СН). – 99126428/12, заявл. 14.12.1999; опубл. 10.09.2001, Бюл. №25.
26. Пат. 2413562 Российская Федерация, МПК В01D 3/00. Устройство входа текучей среды для аппарата / Бахманн К.Г., Шеффер П., Мутгли Ф.; заявитель и патентообладатель Зульцер Хетех АГ (СН). – 2007117404/04, заявл. 10.05.2007; опубл. 10.03.2011, Бюл. №7.
27. Пат. 201856 Российская Федерация, МПК В01D 3/32. Устройство ввода сырья для тарельчатых колонных аппаратов / Сидоров Г.М.; заявитель и патентообладатель Сидоров Г.М. – 2020109456, заявл. 03.03.2020; опубл. 15.01.2021, Бюл. №2.
28. Валеев, А.Р. Исследование по равномерности распределения жидкой фазы методом CFD-анализа / А.Р. Валеев, С.К. Чуракова // Теория и практика массообменных процессов химической технологии: материалы VI Межд. науч. конф. – Уфа, 2021. – С. 43-44.
29. Петрашова, Е.Н. Разработка и испытания нового каплеулавливающего устройства / Е.Н. Петрашова, М.Г. Лагуткин, А.С. Пушнов, В.И. Шишов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – №4. – С.22-25.
30. Чуракова, С.К. Внедрение перекрёстноточных каплеуловителей с целью интенсификации работы массообменных аппаратов / С.К. Чуракова, К.Ф. Богатых, Г.М. Сидоров, Р.Н. Резяпов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – №6. – С. 7-19.
31. Чуракова, С.К. Модернизация ректификационного оборудования с использованием перекрёстноточных насадочных контактных устройств / С.К. Чуракова, Г.М. Сидоров, Р.Н. Резяпов, К.Ф. Богатых // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2013. – №11. – С. 29-34.
32. Нестеров, И.Д. Перекрестноточный каплеуловитель разборной конструкции для колонны щелочной очистки пирогаза / И.Д. Нестеров, К.Ф. Богатых, С.С.

Хайрудинова, Д.Д. Ильясов // В книге: 56-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: Изд. УГНТУ. – 2005. – С. 98.

33. Bunsal, H. CFD Simulation on Vane Type Feed Inlet Device in a Column- Vapour Flow Analysed for Two Different Feed Streams / H. Bansal, A. Sayal, P. Singh, V. Gupta // *Elixir Chem. Engg.*, 2014 – №66. – P. 20721-20725.

34. Casey, M. Applications of computational fluid dynamics for process engineering at Sulzer / M. Casey, E. Lang, R. Mack, R. Schlegel, M. Wehrli // *Speedup*, 1998. – №12, – P. 43-51.

35. Wehrli, M. Influence of vapour feed design on the flow distribution below packings / M. Wehrli, S. Hirschberg, R. Schweizer // *I. Chem. Eng*, 2003. – №81. – P. 116-121.

36. Haghshenasfard, M. CFD Simulation of Gas Distribution Performance of Gas Inlet Systems in Packed Columns / M. Haghshenasfard, M. Zivdar, R. Rahimi, M. Nasr Esfahany // *Chem. Eng. Technol*, 2007. – №9. – P. 1176-1180.

37. Zheng, S. Numerical simulation of flow field in a quench oil tower / S. Zheng, S. Zhang, Z. Gao // *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference (San Antonio, Texas)*, 2007.

38. Pham, H.H. Hydrodynamics and design of gas distributor in large-scale amine absorbers using computational fluid dynamics / H.H. Pham, Y.I. Lim, S. Han, B. Lim, H.S. Ko // *Korean J. Chem. Eng.*, 2018. – Vol. 35. – P. 1073-1083.

39. Liu, D. CFD simulation of gas-liquid performance in two direction vapour horn / D. Liu, X. Li, S. Xu, H. Li // *Chemical Engineering Research and Design*, 2007. – Vol. 85. – P. 1375-1383.

40. Stoter, F. Modelling and measurement of gas flow distribution in corrugated sheet structured packings / F. Stoter, Ž. Olujić, J. de Graauw. // *I. ChemE Symp.*, 1992. – №128. – P. 201-210.

41. Fan, L. Hydraulic performance of gas feed distribution devices / L. Fan, G. Chen, S. Constanzo, A. Lee // *I.Chem. Eng. Symp. Ser.*, 1997 – №142. – P. 899-906.

42. Mohamed Ali, A. Experimental characterization and computational fluid dynamics simulation of gas distribution performance of liquid (re)distributors and collectors in

- packed columns / A. Mohamed Ali, P.J. Jansens, Ž. Olujić // I. Chem. Eng., 2003. – №81. – P. 108-115.
43. Petrova, T. Mathematical modeling of gas distribution in packed columns / T. Petrova, K. Semkov, C. Dodev // Chemical Engineering and Processing, 2003. – Vol. 42. – P. 931-937.
44. Pilling, M., Entrainment Issues in Vacuum Column Flash Zones / M. Pilling, M. Roza, S. M. Wong // Pet. Technol. Q. 2010. – Vol. 15 (1). – P. 57– 65.
45. Маннанов, Т.И. CFD-анализ – современный подход к исследованию процесса разделения и распределения потоков в устройствах ввода сырья массообменных аппаратов / Т.И. Маннанов, С.К. Чуракова, Д.В. Лесной, Е.К. Константинов, К.А. Муллабаев // Булатовские чтения, 2020. – Т.5. – С. 159-165.
46. Пат. 151814 Российская Федерация, МПК В01Д 45/00, С10С 3/04. Устройство для сепарации газов окисления производства битумов / Хафизов И.Ф., Хафизов Ф.Ш., Николаев С.И.; заявитель и патентообладатель ООО «Эконептехимтехника» (RU). – 2014111942/05, заявл. 27.03.2014; опубл. 20.04.2015, Бюл. №11.
47. Стуликов, Д.А. Совершенствование технологического сепарационного оборудования подготовки газа / Д.А. Стуликов // Академический журнал Западной Сибири, 2016. – Т.12. №2. – С. 26-28.
48. Колокольцев, С.Н. Повышение эффективности межступенчатых сепараторов сырьевой КС Коробковского ГПЗ / С.Н. Колокольцев, А.Ю. Аджиев, С.И. Бойко, А.В. Литвиненко // Нефтепромысловое дело, 2007. – №10. – С. 65-66.
49. Пат. 2140317 Российская Федерация, МПК В01Д 45/12. Центробежный сепарационный элемент / Бойко С.И., Гугучкин В.В., Килинник С.В.; заявитель и патентообладатель ООО Научно-исследовательский и проектный институт по переработке газа – 98116421/12, заявл. 25.08.1998; опубл. 27.10.1999, Бюл. № 30.
50. Ефимов, В.В. Модернизация входных сепараторов на газовых промыслах Сенюманской залежи Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения по проекту ООО «Зульцер Хемтех» / В.В. Ефимов, Д.В. Халиулин, Л.Э. Халиулина // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки, 2018. – №11. – С. 502-506.

51. Купцова, О.В. Обзор конструктивных решений газожидкостных сепараторов, применяемых при подготовке нефти / О.В. Купцова, У.А. Новикова, Д.Г. Новиков // В сборнике: Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сборник статей по материалам XXX международной научно-практической конференции, 2018. – С. 55-64.
52. Пат. 2153915 Российская Федерация, МПК В01D 45/00, В01D 19/00. Газожидкостный сепаратор / Бойко С.И., Касапов Н.К., Килинник С.В.; заявитель и патентообладатель ООО Научно-исследовательский и проектный институт по переработке газа. – 99101467/12, заявл. 27.01.1999; опубл. 10.08.2000, Бюл. №22.
53. Габдулов, И.Н. Обзор сепарационных вихревых элементов фирмы Зульцер / И.Н. Габдулов // Достижения науки и образования, 2019. – № 12. – С. 15-17.
54. Габдулов, И.Н. Обзор каплеуловительных устройств фирмы Sulzer / И.Н. Габдулов // Наука и образование сегодня, 2019. – № 12. – С. 15-17.
55. Клочков, В.И. Многоступенчатая сепарация многокомпонентных систем / В.И. Клочков, А.В. Беглова // В сборнике: Проблемы науки. Материалы Всерос. науч.-техн. конференции, 2019. – С. 44-46.
56. Совершенствование насадок для сепарации капель в контактных аппаратах: специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий»: дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / Петрашова Екатерина Николаевна; ФГБОУ ВПО МГУИЭ. – Москва, 2012. – 154 с.
57. Петрашова, Е.Н. Газораспределение в слое нерегулярной насадки скрубберных аппаратов для очистки отходящих газов / Е.Н. Петрашова, А.С. Пушнов, М.Г. Лагуткин // Экология и промышленность России, 2011. – №3. – С. 6-9.
58. Пат. 95555 Российская Федерация, МПК В01J 19/30. Насадка для тепло- и массообменных аппаратов / Соколов А.С., Пушнов А.С., Юдина Л.А., Каган А.М., Петрашова Е.Н.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО "Московский государственный университет инженерной экологии" (RU). – 2008126732/22, заявл. 02.07.2008; опубл. 10.07.2010, Бюл. №19.

59. Пат. 2440843 Российская Федерация, МПК В01J 19/32. Способ регулярной укладки кольцевой насадки / Пушнов А.С., Петрашова Е.Н., Лагуткин М.Г.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО "Московский государственный университет инженерной экологии" (RU). – 2010108213/05, заявл. 09.03.2010; опубл. 27.01.2012, Бюл. №3.
60. Афанасенко, В.Г. Разработка конструкции каплеотбойника для разделения гетерогенных систем / В.Г. Афанасенко // Молодежный научный вестник, 2017. – № 12. – С. 150-153.
61. Пат. № 68351 Российская Федерация, МПК В01D 45/06. Сепаратор-каплеотбойник / Афанасенко В.Г., Боев Е.В., Иванов С.П., Шулаев Н.С., Николаев Е.А., Хафизов Н.Ф.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (RU). – 2007126698/22, заявл. 12.07.2007; опубл. 27.11.2007, Бюл. № 33.
62. Афанасенко, В.Г. Процесс сепарации в промышленных градирнях / В.Г. Афанасенко, Е.В. Боев, С.П. Иванов, Е.А. Николаев // Бутлеровские сообщения, 2011. – Т. 27. № 13. – С. 81-84.
63. Иванов, С.П. Разработка полимерного водоуловителя градирен / С.П. Иванов, Е.В. Боев // Нефтепереработка и нефтехимия, 2007. – №10. – С. 36-37.
64. Афанасенко, В.Г.. Разработка конструкций полимерных водоуловителей градирен с использованием сил центробежной сепарации // В.Г. Афанасенко, Ф.Ш. Хафизов, Н.Ф. Хафизов, С.П. Иванов, Е.В. Боев // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2007. – №11. – С. 11-12.
65. Совершенствование тепломассообменных процессов в водооборотных циклах промышленных предприятий 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий»: дисс. на соиск. уч. степ. д-ра. техн. наук / Иванов Сергей Петрович; ФГБОУ ВО УГНТУ. – Уфа, 2012. – 250 с.
66. Чуракова, С.К. Внедрение отечественных высокоэффективных контактных устройств – путь к ресурсо- и энергосбережению / С.К. Чуракова, Д.Д. Ильясов // Новые технологии в области переработки углеводородного сырья: материалы заседания секции «Комплексная переработка газа и газового конденсата» НТС

ПАО «Газпром» (г. Сургут, 1–3 ноября 2017 г.): в 2 ч. – М: ООО «НИИгазэкономика», 2018. – Ч. 2. – С. 15-27.

67. Пат. 2577055 Российская Федерация, МПК В01D 45/08, В01D 45/18. Вертикальный сепаратор для разделения неоднородных систем газ-жидкость типа "туман" / Мнушкин И.А., Самойлов Н.А., Мифтахов Д.И.; заявитель и патентообладатель Мнушкин И.А. – 2014142157/05, заявл. 20.10.2014; опубл. 10.03.2016, Бюл. №7.

68. Пат. 2574622 Российская Федерация, МПК В01D 19/00, В01D 21/02, В01D 17/028. Отстойник для разделения неоднородной системы газ (пар)-жидкость с низкой концентрацией дисперсной газовой (паровой) фазы в жидкой фазе / Мнушкин И.А.; заявитель и патентообладатель Мнушкин И.А. – 2014143523/05, заявл. 29.10.2014; опубл. 10.02.2016, Бюл. №4.

69. Бойко, С.И. Особенности модернизации действующего сепарационного оборудования в условиях сбора и подготовки попутного нефтяного газа / С.И. Бойко, А.В. Литвиненко, М.А. Грицай, А.А. Светов, А.Ю. Арестенко, Б.М. Морозов, Т.Н. Шульга // Нефтепромысловое дело, 2011. – №1. – С. 39-42.

70. Пат. 2614699 Российская Федерация, МПК В01D 19/00. Газожидкостный сепаратор / Аухадеев Р.Р., Набиуллин Р.Ф., Гараев А.А., Набиуллин Ф.Г., Исламова Ч.С.; заявитель и патентообладатель ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина (RU). – 2015153578, заявл. 14.12.2015; опубл. 28.03.2017, Бюл. №10.

71. Пат. 2612739 Российская Федерация, МПК В01D 19/00. Газожидкостный сепаратор / Аухадеев Р.Р., Набиуллин Р.Ф., Гараев А.А., Набиуллин Ф.Г., Исламова Ч.С.; заявитель и патентообладатель ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина (RU). – 2015463951, заявл. 13.10.2015; опубл. 13.03.2017, Бюл. №8.

72. Пат. 2469770 Российская Федерация, МПК В01D 45/12. Сепаратор для очистки газа / Фарахов М.И., Ахлямов М.Н., Байгузин Ф.А., Нигматов Р.Р., Шигапов И.М.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-внедренческий центр «Инжехим» (RU). – 2011126832/02, заявл. 29.06.2011; опубл. 20.12.2012, Бюл. №35.

73. Пат. 2654943 Российская Федерация, МПК В01D 45/12, В01С 3/00. Циклон, циклонный каплеуловитель и способ их использования / Ниевоудт И., Гризел Ч.А.; заявитель и патентообладатель Кох-Глич, ЛП (US). – 2015132099, заявл. 27.11.2013; опубл. 23.05.2018, Бюл. №15.
74. Пат. 2736035 Российская Федерация, МПК В01D 45/12. Газодинамический сепаратор (варианты) / Курочкин А.В.; заявитель и патентообладатель Курочкин А.В. – 2017139999, заявл. 16.11.2017; опубл. 11.11.2020, Бюл. №32.
75. Пат. 2688838 Российская Федерация, МПК В01D 45/06. Газожидкостный сепаратор / Падован Л.; заявитель и патентообладатель Дженерал Электрик Текнолоджи ГмбХ (СН). – 2015153820, заявл. 16.12.2015; опубл. 22.05.2019, Бюл. №15.
76. Пат. 2424846 Российская Федерация, МПК В01D 45/12. Прямоточный спиральный сепаратор / Литра А.Н., Кунина П.С., Поляков А.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет» (RU). – 2010100047/05, заявл. 11.01.2010; опубл. 27.07.2011, Бюл. №21.
77. Мильштейн, Л.М. Оценка габаритных и массовых характеристик нефтегазовых сепараторов / Л.М. Мильштейн // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2013. – №4. – С. 4-11.
78. Мильштейн Л.М., Бойко С.И., Запорожец Е.П. Нефтегазопромысловая сепарационная техника: справ. пособ.: под ред. Л.М. Мильштейна. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
79. СТО Газпром 2-2.1-588-2011. Типовые технические требования к технологическому оборудованию для объектов добычи газа. М.: ОАО «Газпром», 2012. – 105 с.
80. Слугин, П.П. Инновационные подходы к традиционным технологиям сепарации на примере установки низкотемпературной сепарации ГП-1 Бованенковского НГКМ с применением импортозамещающих технических решений / П.П. Слугин, П.С. Корчагин, В.Ю. Артеменков, А.П. Козлов, Д.М.

Третьяк, Д.В. Демидов // Газовая промышленность. – 2018. – №4 (Спецвыпуск) т.776. – С. 54-58.

81. Толстов, В.А. Определение содержания капельной жидкости и механических примесей в газовом потоке. Методика и средства измерения / В.А. Толстов, А.П. Ромашов, В.В. Панин // Экспозиция Нефть Газ. – 2014. – №4, т. 36. – С. 10-15.

82. Моделирование технологических процессов на платформе UNISIM Design: особенности, преимущества, функциональные возможности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.honeywellprocess.com>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 04.12.2018).

83. Peng, D.Y. A Two Constant Equation of State / D.Y. Peng, D.V. Robinson // I.E.C. Fundamentals, 1976. – Vol. 15. – P. 59-64.

84. McDonald, C.M. Global optimization for the phase and chemical equilibrium problem: Application to the NRTL equation / C.M. McDonald, C.A. Floudas // Computers & Chemical Engineering, 1995. – Vol.19. – P. 1111-1139.

85. Чуракова, С.К. Разработка ресурсо-энергосберегающих технологий фракционирования на основе конструктивно-технологического подхода / С.К. Чуракова, К.Ф. Богатых // Технологии нефти и газа, 2013. – №4 (87). – С. 8-14.

86. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев – СПб: Из-во Балт. гос. техн. ун-т. – 2001. – 108 с.

87. Launder, B The numerical computation of turbulent flows / B. Launder, D. Spalding // Computer Methods in Applied Mechanics and Energy, 1974. Vol. 3. – P. 269–289.

88. Frey, P.J. Anisotropic mesh adaptation for CFD computations / P.J. Frey, F. Alauzet // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005. – Vol.194. – P. 5068-5082.

89. Ruge, J.W. Algebraic multigrid. / J.W. Ruge, K. Stüben // In: McCormick, S.F. (ed.) Multigrid methods, Front. Math. Appl, 1987. – Vol. 3. – P. 73–130.

90. Shives, M. Mesh and load distribution requirements for actuator line CFD simulations / M. Shives, C. Crawford // Wind Energy, 2013. – Vol. 16. – P. 1183-1196.

91. Gropp, W.D. High-performance parallel implicit CFD / W.D. Gropp, D.K. Kaushik, D.E. Keyes, B.F. Smith // *Parallel Computing*, 2001. – Vol. 27. – P. 337-362.
92. Туманова, Е.Ю. CFD-моделирование в ANSYS CFX. Гидродинамика жидкости на клапанных тарелках / Е.Ю. Туманова, О.Г. Имаев – Уфа, изд-во УГНТУ. – 2017. – 28 с.
93. Захарова, Д.Н. CFD-анализ ситчатой тарелки / Д.Н. Захарова, Ф.Ш. Вильданов, Р.Ф. Ахметов, Т.Х. Рахимов, С.К. Чуракова // *Башкирский химический журнал*, 2019. – №2 (26). – С. 121-126.
94. Aung, K. Design and implementation of an undergraduate computational fluid dynamics (CFD) course / K. Aung // *2003 Annual Conference*. – 2003. – P. 8.367.1 – 8.367.8.
95. Burns, A. Application of coupled solver technology to CFD modeling of multiphase flows with CFX / A. Burns, A. Splawski, S. Lo, C. Guetari // *WIT Transactions on Engineering Sciences*. – 2001. – Т. 30.
96. About Ansys [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ansys.com/about-ansys> (дата обращения 24.11.2019).
97. Сидоров, Г.М. Моделирование работы статического смесителя (нефть – вода) для обессоливания нефти и опытно-промышленное испытание / Г.М. Сидоров, Б.А. Яхин, Р.Ф. Ахметов // *Успехи современного естествознания*, 2017. – № 2. – С. 152-156.
98. Ахметов, Р.Ф. Моделирование процесса смешения нефти и воды в статических смесителях методом CFD-анализа / Р.Ф. Ахметов, Ю.Н. Зайцев, Г.М. Сидоров, А.Ф. Ахметов // В сборнике: В сборнике: Нефтегазопереработка – 2016. Материалы межд. науч.-практ. конф. – 2016. – С. 177-178.
99. 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.
100. Афанасенко, В.Г. Применение программного комплекса Flow Vision в исследовании влияния геометрических размеров шнека на эффективность

смешения двухкомпонентной смеси / В.Г. Афанасенко, Ф.Ш. Хафизов, А.Ш. Хайбрахманов // Вестник машиностроения, 2009. – №4. – С. 30-34.

101. Константинов, Е.К. Исследование влияния пенообразования на работу перекрестноточных тарелок / Е.К. Константинов, С.К. Чуракова // Теория и практика массообменных процессов химической технологии: материалы VI Межд. науч. конф. – Уфа, 2021. – С. 41-42.

102. Литовских, Д.Л. Исследование гидродинамических и массообменных характеристик клапанных тарелок на лабораторном стенде с использованием CFD анализа / Д.Л. Литовских, С.К. Чуракова // Булатовские чтения, 2021. – Т.2. – С. 167-170.

103. Муллабаев, К.А. Исследование конструкций перераспределительных тарелок насадочных экстракционных колонн методами CFD-анализа / К.А. Муллабаев, Д.В. Лесной, С.К. Чуракова // Теория и практика массообменных процессов химической технологии: материалы VI Межд. науч. конф. – Уфа, 2021. – С. 116-117.

104. Муллабаев, К.А. Разработка методов оценки равномерности распределения фаз в насадочных экстракторах средствами CFD-систем / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова, А.Р. Валеев // Башкирский химический журнал, 2022. – №2. – С. 71-76.

105. Фаизов, А.Р. Определение перепада давления неорошаемых перекрестноточных насадочных контактных устройств при помощи системы ANSYS Fluent / А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова, Г.М. Сидоров // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2018. – № 2. – С. 42-45.

106. Лесной, Д.В. Исследование конструкций перекрестноточных насадочных элементов в среде ANSYS CFX / Д.В. Лесной, С.К. Чуракова, Т.И. Маннанов, Е.К. Константинов, К.А. Муллабаев // Булатовские чтения, 2020. – Т.5. – С. 134-137.

107. Котельников, Д.А. Моделирование нерегулярных насадочных контактных устройств средствами вычислительной гидродинамики / Д.А. Котельников, Р.Ф. Ахметов, Э.Г. Теляшев, А.Ю. Котельникова, А.Р. Набиева // Башкирский химический журнал, 2020. – №2. – С. 74-80.

108. Лесной, Д.В. Исследование гидродинамических характеристик орошаемых перекрестноточных насадочных блоков различных конструкций / Д.В. Лесной, С.К. Чуракова // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2021. – № 1. – С. 28-31.
109. Совершенствование конструктивного оформления теплообменных и массообменных аппаратов: специальность 2.6.13 «Процессы и аппараты химических технологий»: дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / Лесной Денис Вячеславович; ФГБОУ ВО УГНТУ. – Уфа, 2021. – 140 с.
110. 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.
111. 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.
112. Мнушкин, И.А. Изомеризация бензиновых фракций – путь к увеличению производства высокооктановых компонентов бензинов на Сургутском ЗСК / И.А. Мнушкин, Е.Г. Ахметзянов, С.К. Чуракова, А.Е. Белоусов, А.В. Стуков // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2018. – №4. – С. 3-8.
113. Маннанов, Т.И. Ресурсо – энергосберегающая технология деизопентанизации для квалифицированного использования ресурсов изопентана / Т.И. Маннанов, К.Ю. Денисов, С.К. Чуракова, А.Г. Чиркова, И.Д. Нестеров // В сборнике: Нефтегазопереработка – 2017. Материалы межд. науч.-практ. конф. – 2017. – С. 162-164.
114. Файрузова, Д.А. Снижение энергозатрат в колонне выделения этан-этиленовой фракции блока фракционирования пирогаза / Д.А. Файрузова, Т.И.

- Маннанов // В сборнике: Перспективы инновационного развития химической технологии и инженерии: Материалы II Межд. науч.-практ. конф. – 2021. – С. 192.
115. 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.
116. Совершенствование аппаратного оформления фракционирующего оборудования и схем разделения многокомпонентных смесей: специальность 05.17.07 «Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ»: дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук / Фаизов Азамат Рамилевич; ФГБОУ ВО УГНТУ. – Уфа, 2019. – 140 с.
117. Чуракова, С.К. Сравнение областей устойчивой работы ситчатой тарелки и клапанной тарелки PЕTON с подвижным круглым клапаном / С.К. Чуракова, Д.В. Лесной, Т.И. Маннанов, Е.К. Константинов, К.А. Муллабаев // 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. 175-178.
118. Волков, Р.С. Особенности процессов деформации движущихся в газовой среде капель жидкостей / Р.С. Волков, А.О. Жданова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Журнал технической физики, 2015 – Т. 85. №10. – С. 29-33.
119. Белоусов, Д.С. Межфазная поверхность на контактных тарелках абсорбционных и ректификационных колонн / Д.С. Белоусов, Е.В. Янчуковская // Молодёжный вестник ИрГТУ, 2020. – Т.10. № 4 – С. 46-53.
120. Деревич, И.В. Относительная скорость частиц в турбулентном потоке / И.В. Деревич // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа, 2008. – №3. – С. 29-40.
121. Лабунцов, Д.А. Механика двухфазных систем: Учебное пособие для вузов / Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов – М.: Из-во МЭИ, 2000. – 374 с.
122. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин – М.: Химия, 1971. – 784 с.

123. Коломиец, Л.В. Метод наименьших квадратов: метод. указания / Л.В. Коломиец, Н.Ю. Поникарова. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017 – 32 с.
124. Ковтунец, А.А. Решение систем линейных уравнений методом Крамера в табличном процессоре Microsoft Excel / А.А. Ковтунец // Вестник современных исследований, 2017. – № 6-1 (9). – С. 171-175.
125. Маннанов, Т.И. Исследование 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.
126. 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.
127. 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.
128. 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.
129. 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.
130. Нуриев, Н.К. Обработка экспериментальных данных в задачах химического профиля методом наименьших квадратов в программных средах Microsoft Office Excel и Mathcad / Н.К. Нуриев, Е.В. Пашукова // Вестник Марийского государственного университета, 2011. – № 7. – С. 116-118.
131. 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.

132. Романова, Н.А. Структурно-энергетическая оптимизация технологии выделения фенола и ацетона с использованием компонентов реакционной смеси в качестве разделяющих агентов / Н.А. Романова, В.С. Леонтьев // Нефтехимия. – 2017. – №3 (58). – С. 319-324.

133. 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.

134. Пат. 2773283 Российская Федерация, МПК В01D 53/18. Устройство подачи сырья в массообменный аппарат (варианты) / Маннанов Т.И., Чуракова С.К., Маннанова И.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (RU). – 2021119463, заявл. 01.07.2021; опубл. 01.06.2022, Бюл. №16.

135. Пат. 211921 Российская Федерация, МПК В01D 3/28. Устройство ввода парожидкостного сырья в массообменный аппарат / Маннанов Т.И., Чуракова С.К.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (RU). – 2022103332, заявл. 09.02.2022; опубл. 28.06.2022, Бюл. №19.

136. Чуракова, С.К. Модернизация ректификационного оборудования с использованием перекрёстных насадочных контактных устройств / С.К. Чуракова, Г.М. Сидоров, Р.Н. Резяпов, К.Ф. Богатых // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний, 2013. – № 11. – С. 29-34.

137. 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.

138. 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.

139. Чуракова, С.К. Техничко-эксплуатационные характеристики вакуумных колонн, оборудованных регулярными насадками различных типов / С.К. Чуракова, И.Д. Нестеров, К.Ф. Богатых // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2013. – № 4. – С. 51-56.

140. Маннанов, Т.И. Исследование насадочных каплеотбойных устройств методом CFD-анализа / Т.И. Маннанов, С.К. Чуракова // Химия и технология топлив и масел, 2022. – №3.Т. 621. – С. 53-56.

141. Программа для ЭВМ 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)



**Общество с ограниченной ответственностью
«Научно Исследовательский Проектный Институт нефти и газа «Петон»
(ООО «НИПИ НГ «Петон»)**

В диссертационный совет 24.2.428.02
при ФГБОУ ВО «Уфимском государственном
нефтяном техническом университете»
450064, Республика Башкортостан, г. Уфа,
ул. Космонавтов, д.1

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**результатов диссертационного исследования
Маннанова Тимура Ильнуровича**

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Маннанова Т.И. на тему «Исследование гидродинамических характеристик устройств ввода сырья и каплеотбойных устройств для колонного и сепарационного оборудования», в частности, исследования насадочных каплеотбойников были использованы при разработке методики определения капельного уноса жидкости с газом сепарации М У05-01-2019, а также при выполнении работ по подбору каплеотбойных устройств и исследованию капельного уноса жидкости с газом сепарации для объектов: газосепаратор С2 компрессорной станции Еты-Пуровского месторождения, газосепаратор ГС-1/1 Дожимной насосной станции №2 Ярайнерского месторождения АО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз». Получены акты выполненных работ.

Результаты научных исследований Маннанова Т.И. обладают актуальностью, представляют практический интерес для интенсификации работы сепарационного оборудования

Главный технолог
ООО «НИПИ НГ «ПЕТОН»

Подпись Мингалимова З.Ф. заверяю
Руководитель УРП ДПиОР



З.Ф. Мингалимов

Г.Р. Сафиуллина

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НЕФТЯНОЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (ФГБОУ ВО "УГНТУ")ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, Республика Башкортостан, 450064. Тел.: (347) 242-03-70, факс: (347) 243-14-19, <http://www.rusoil.net>, E-mail info@rusoil.net
ИНН 0277006179, ОГРН 1020203079016, ОКПО 02069450, КПП 027701001

06.03.2023 № 061-17/34

На № _____ от _____

СПРАВКА

**об использовании учебного пособия
«Расчет процесса и аппаратурного оформления ректификации бинарной
и многокомпонентной смеси» в учебном процессе**

Учебное пособие «Расчет процесса и аппаратурного оформления ректификации бинарной и многокомпонентной смеси», разработанное Маннановым Т.И. совместно с авторами, используется на кафедре «Нефтехимия и химическая технология» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный технический университет» для проведения практических занятий и курсовых проектов в рамках дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» и предназначено для бакалавров:

направления 18.03.01 Химическая технология:

- профиль «Химическая технология органических веществ» (БТС);
- профиль: «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов» (БТП);
- профиль: «Химическая технология реагентов нефтегазодобычи и нефтегазопереработки» (БНХ);

направления 19.03.01 Биотехнология:

- профиль: «Биотехнология» (БТБ);

направления 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии:

- профиль: «Основные процессы химических производств и химическая кибернетика» (БТК);
- профиль: «Газохимия» (БТГ);
- профиль «Техника защиты нефтегазового оборудования от коррозии» (БМК);
- профиль: «Техника переработки твердого топлива, нефти и газа» (БМА);
- профиль: «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» (БОС).

Проректор по научной и
инновационной работе

