

*На правах рукописи*



ЛЕСНОЙ ДЕНИС ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ОФОРМЛЕНИЯ  
ТЕПЛООБМЕННЫХ И МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

2.6.13. - Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Уфа 2021

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

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент  
**Чуракова Светлана Константиновна**

Официальные оппоненты:

**Григорян Леон Гайкович**  
доктор технических наук, профессор  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» / кафедра «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств», профессор

**Романова Наталья Александровна**  
кандидат технических наук,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» / кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств», доцент

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград

Защита диссертации состоится «15» декабря 2021 года в 14-00 на заседании диссертационного совета 24.2.428.02 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

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

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Бадикова Альбина Дарисовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Теплообменные и массообменные процессы очень широко распространены в нефтегазовой, нефтехимической и химической отраслях промышленности. Энергоэффективность этих процессов определяет базовую экономику всего производства. На текущий момент наблюдается дефицит публикаций, посвященных интенсификации тепловых и массообменных процессов из-за сложностей физического моделирования на реальных средах, а также сложностей материально-технического обеспечения для экспериментальных и опытно-промышленных исследований. Поэтому в настоящее время для поиска путей совершенствования конструктивного оформления теплообменного и массообменного оборудования проводятся численные исследования в специализированных расчетных средах. Это в свою очередь открывает перспективы проведения исследований без конструирования стенда и позволяет проводить эксперименты на средах, относящихся к токсичным и пожароопасным категориям, тем самым приближая условия работы аппаратов к реальным условиям, чего в реальности добиться практически невозможно ввиду отсутствия для проведения экспериментов полупромышленных установок. Поэтому на сегодняшний момент актуальна не только разработка концепций по совершенствованию конструктивного оформления теплообменных и массообменных аппаратов, но и развитие численных методов исследования, таких как CFD-моделирование.

### **Степень разработанность темы исследования**

Проблеме совершенствования конструктивного оформления АВО посвящены работы российских учёных: Кунтыш В.Б., Бессонный А.Н., Дрейцер Г.А., Пиир А.Э. Проблеме совершенствования аппаратурного оформления фракционирующего оборудования посвящены работы многих российских и зарубежных ученых: Марушкина Б. К., Александрова И.А., Лебедева Ю.Н., Мановяна А.К., Богатых К.Ф., Мнушкина И.А., Чураковой С.К., Henry Z. Kister и других. Исследованию работы внутренних контактных устройств с использованием CFD-анализа посвящены работы ученых: Amini, Y., Rahimi M., Olenberg, A., Mahr, B., Mewes, D.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствует формуле специальности 2.6.13: совершенствование аппаратурного оформления технологических процессов с позиций энерго- и ресурсосбережения. Область исследования: исследования тепловых процессов в технологических аппаратах и технологических схемах, исследования массообменных процессов и аппаратов.

**Целью диссертационной работы** является разработка решений и выполнение исследований для совершенствования конструктивного оформления теплообменного и массообменного оборудования

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

1. Совершенствование конструктивного оформления теплообменной секции аппарата воздушного охлаждения с целью увеличения коэффициента теплопередачи.

2. Определение области устойчивой работы тарелок различного типа.
3. Разработка решения по расширению диапазона устойчивой работы тарельчатых контактных устройств.
4. Исследование методом CFD-анализа гидродинамических характеристик орошаемых перекрестноточных насадочных блоков различной конструкции.
5. Определение областей применения перекрестноточных насадочных блоков с различной ориентацией гофр.

#### **Научная новизна**

1. Разработан принцип продольного секционирования межтрубного пространства аппаратов воздушного охлаждения, обеспечивающий контакт воздуха и охлаждаемой среды в противотоке с целью интенсификации процесса теплоотдачи с воздушной стороны.
2. Предложен метод определения оптимального числа секций в межтрубном пространстве аппаратов воздушного охлаждения с учетом изменения симплекса подобия энергетической эффективности и симплекса подобия гидродинамической затратности.
3. Впервые методом CFD-анализа на двухфазной среде проведена сравнительная оценка гидродинамических характеристик перекрестноточных насадочных устройств с вертикальной и горизонтальной ориентацией гофр.
4. Обоснованы при помощи CFD-анализа области применения перекрестноточных насадочных устройств с вертикальной и горизонтальной ориентацией гофр в зависимости от удельных парожидкостных нагрузок.

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

Разработана принципиально новая конструкция АВО, которая позволяет увеличить общий коэффициент теплопередачи процесса охлаждения в аппарате за счёт реализации противоточной схемы взаимодействия охлаждаемой среды и атмосферного воздуха путём установки секционирующих перегородок в межтрубном пространстве. Данная конструкция обеспечивает уменьшение требуемой поверхности теплообмена и улучшение массогабаритных характеристик аппарата. Получен патент на полезную модель № 200615 (РФ) МПК F28D 21/00.

Разработана методика по оценке теплообменной эффективности для новых технических решений по совершенствованию конструктивного оформления АВО, которая позволяет определить оптимальное количество секционирующих перегородок в межтрубном пространстве аппаратов воздушного охлаждения с учетом изменения теплообменных и гидродинамических характеристик аппарата.

Разработано учебное пособие по расчету и подбору АВО, которое может быть использовано для обучения студентов технологических специальностей в рамках курса «Процессы и аппараты химической технологии», а также для выполнения инженерных расчетов работниками нефтяной, газовой и нефтехимической промышленности. Получен акт внедрения.

Выполнена экспериментальная оценка области устойчивой работы клапанной тарелки с полноподъемным клапаном. Проведено сравнение области устойчивой работы клапанной тарелки с полноподъемным клапаном с областью устойчивой работы клапанной тарелкой с круглым клапаном со смещенным центром тяжести, на основании которого можно судить о

расширении области устойчивой работы тарелки за счет применения клапана с равновеликими ножками. Разработано ТУ 3611-002-12752969-19 "Массообменные контактные устройства "РЕТОН" тарельчатого типа", в котором отражены основные размеры конструкции клапана, пределы устойчивой работы тарелки, оборудованной этим клапаном, требования по изготовлению, упаковке, шеф-монтажу. Разработана программа, предназначенная для расчета и подбора клапанных тарелок с полноподъемным клапаном. Получено свидетельство о регистрации программы на ЭВМ № 2020663958, которая предназначена для обучения студентов старших курсов химико-технологических специальностей, а также для выполнения инженерных расчетов работниками нефтяной, газовой и нефтехимической промышленности. Получены патенты на изобретения «Массообменная тарелка» №2738591 (РФ) МПК В01D 3/26 и «Клапанная тарелка массообменной колонны» №2744742 (РФ) МПК В01D 3/16, В01J 19/32. На основании данных, полученных в результате проведенного экспериментального исследования, произведен подбор клапанной тарелки с полноподъемным круглым клапаном и осуществлено её внедрение в колонне стабилизации установки риформинга Л-35/11-600 АО «Газпромнефть-ОНПЗ». Получен акт внедрения.

Разработана конструкция тарелки с Г-образным отбойником. На примере ситчатой тарелки при помощи численного исследования в Ansys CFX показано, что при установке Г-образного отбойника количество жидкости, которое уносится с потоком газа на вышележащую ступень, снизилось на 85% (при анализе распределения скоростей жидкости на полотне тарелки).

С помощью CFD-анализа в Ansys CFX для двухфазной среды выполнена оценка влияния ориентации гофр на гидродинамическую обстановку в блоках перекрестноточной насадки, что позволит определить гидродинамические характеристики и области применения орошаемых ПТН с различной ориентацией гофр.

#### **Методология и методы исследования**

Решение поставленных задач осуществлялось на основе: оптимизации конструктивного оформления АВО за счет разработки технического решения, позволяющего добиться контакта воздуха и охлаждаемой среды в режиме противотока; экспериментальных стендовых испытаний по определению области устойчивой работы клапанной тарелки с круглым полноподъемным клапаном; исследовании гидродинамических характеристик орошаемых перекрестноточных насадочных блоков различной конструкции методом CFD-анализа.

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

1. Техническое решение по совершенствованию конструкции теплообменной секции АВО.
2. Методика оценки теплообменной эффективности для новых технических решений по совершенствованию конструкции аппаратов воздушного охлаждения.
3. Зависимость увеличения коэффициента теплопередачи и перепада давления в межтрубном пространстве от количества перегородок.
4. Результаты экспериментальных исследований по определению области устойчивой работы клапанной тарелки с полноподъемным клапаном.

5. Техническое решение по совершенствованию конструкции тарелок за счет установки Г-образного отбойника.

6. Результаты численных исследований гидродинамических характеристик орошаемых перекрестноточных насадочных блоков с различной ориентацией гофр.

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

Достоверность результатов обеспечивается использованием основных физических закономерностей, применением известных специализированных программных продуктов, а также высокой воспроизводимостью полученных экспериментальных и расчетных данных.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих научных конференциях: Семьдесят первая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием, Ярославль, ЯГТУ, 2018 г.; XI Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники - 2018», Уфа, УГНТУ, 2018г.; 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 Международная научно-практическая конференция «Булатовские чтения», Краснодар, 2019-2020 г.

#### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 18 работ, в том числе: 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, включая 2 статьи в научном журнале, входящем в международную базу Scopus, 1 патент на полезную модель, 2 патента на изобретение, учебное пособие, 10 материалов научно-технических конференций, а также 1 свидетельство на официальную регистрацию программы для ЭВМ.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 101 наименования. Работа изложена на 140 страницах, содержит 21 таблицу и 74 рисунка.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, обозначены её научная и практическая значимость, сформулированы основные цели и задачи исследований.

**В первой главе** приведен анализ различных тарельчатых контактных устройств, рассмотрен метод определения области устойчивой работы, описаны механизмы уноса жидкости с контактной ступени, рассмотрены различные типы насадочных контактных устройств, рассмотрены различные типы АВО.

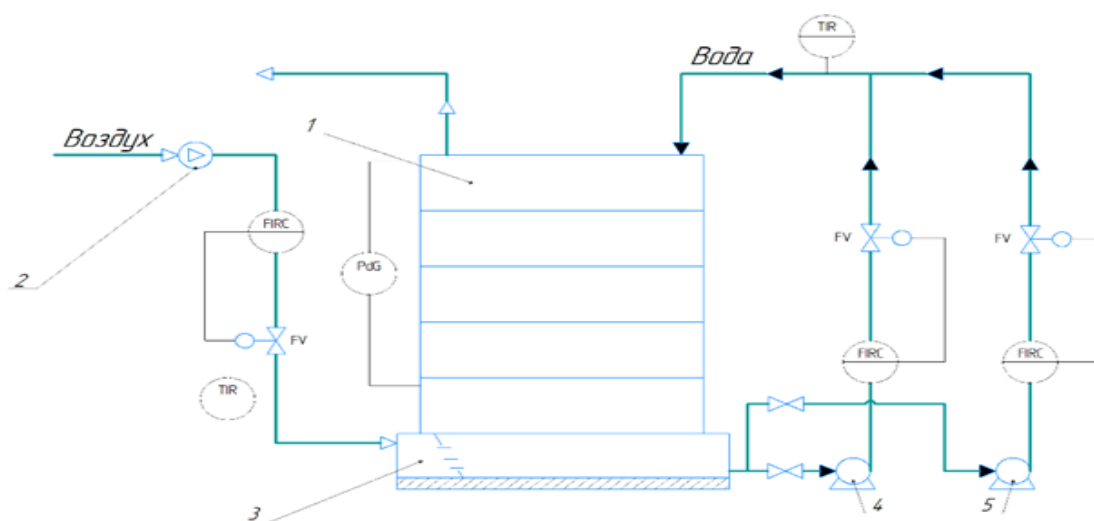
**Во второй главе** рассмотрены экспериментальные и расчетные методы исследования.

Методом исследования при оценке конструктивных изменений теплообменной секции АВО является разработанная методика, подробно описанная в третьей главе, на основе

совмещения расчетов в двух модулях Xace и Xist программного комплекса HTRI и оценки изменения гидравлического критерия и критерия эффективности теплообмена.

Определение области устойчивой работы клапанной тарелки с полноподъемным клапаном происходило с помощью проведения экспериментальных исследований на испытательном стенде, схема которого представлена на Рисунке 1.

Стенд представляет собой вертикальный аппарат прямоугольного сечения, внутри которого имеется возможность размещения тарелок, либо блоков перекрестноточной или противоточной насадки. Испытания проводились на системе вода-воздух. Конструкцией предусмотрен замер перепада давления между тарелками, как одной из определяющих гидравлических характеристик.



1 - колонна, 2 - воздуходувка, 3 - лопастной распределитель, 4,5 - насосы

Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда

Методом исследования Г-образного каплеотбойника и перекрестноточных насадочных блоков являлся CFD-анализ, проводимый в Ansys CFX. Ansys CFX основан, на конечно-объемном методе (МКО) решения уравнений гидродинамики таких как, уравнение неразрывности потока, уравнение сохранения энергии и уравнения Эйлера, Навье-Стокса.

**В третьей главе** приведены результаты разработки новой конструкции и численной оценки повышения теплообменной эффективности предложенной нами новой конструкции АВО, реализующей принцип противотока за счет установки секционирующих перегородок, описана разработанная методика оценки теплообменной эффективности для новых технических решений по совершенствованию конструкции АВО.

В целях интенсификации теплообмена без значительного увеличения стоимости аппарата и существенных изменений технологии производства АВО предложено техническое решение по оснащению аппарата воздушного охлаждения горизонтального типа секционирующими перегородками, прикрепленными в зависимости от хода охлаждаемой среды то к передней, то к задней трубной камере, таким образом, чтобы теплообмен между потоком воздуха и охлаждаемой средой на каждой ступени теплосъема осуществлялся в противотоке,

который обеспечивает увеличение движущей силы процесса за счет более эффективной схемы взаимодействия потоков. На Рисунке 2 приведен сравнительный анализ существующей и предложенной конструкции АВО.

На данный момент отсутствует метод по оценке влияния конструктивных изменений в трубной решетке АВО на теплообмен по воздушной стороне аппарата.

Один из основных инструментов для расчета АВО является модуль Хасе программного комплекса HTRI, который позволяет выполнить моделирование различных режимов работы, конструкторский и поверочный расчеты. Но возможности этого модуля ограничены, поскольку, невозможно выполнить расчет различных изменений конфигурации секции теплообмена кроме характеристик оребрения и формы труб. Это затрудняет расчетную оценку эффективности для новых технических решений по совершенствованию конструкций АВО.

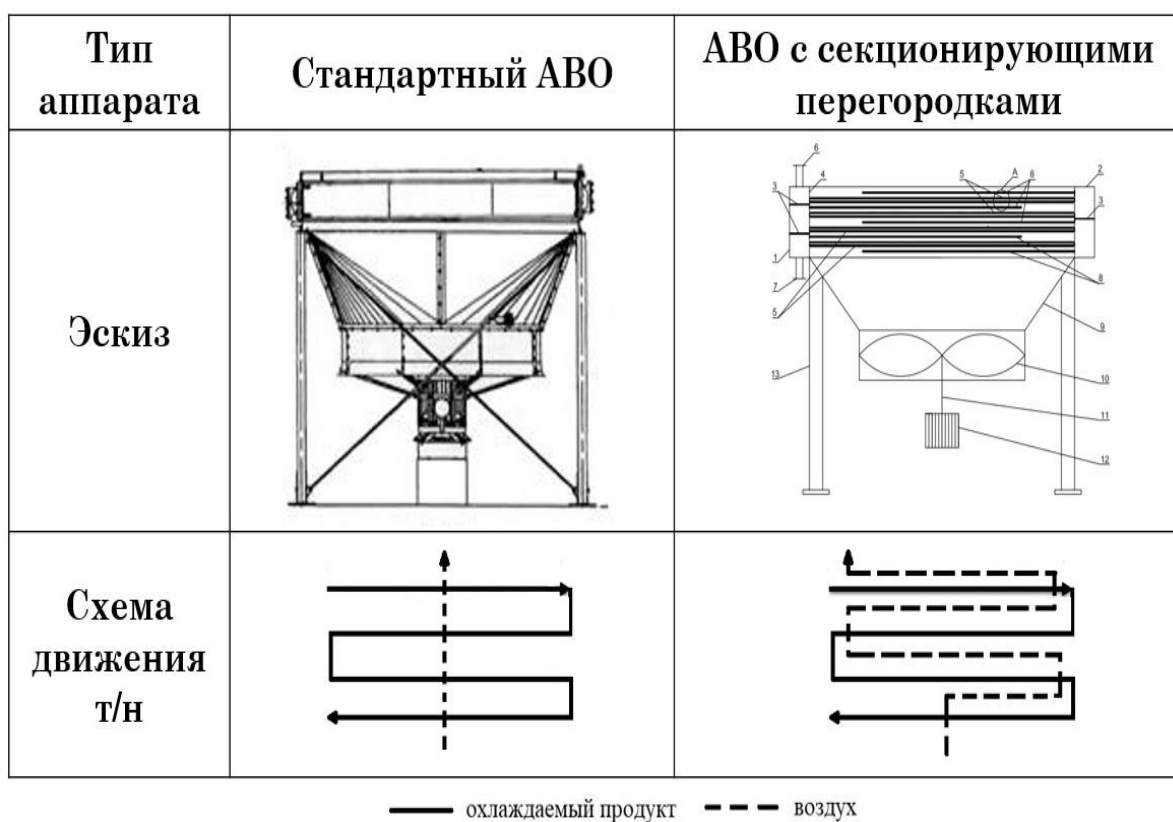


Рисунок 2 – Сравнительный анализ существующей и предложенной конструкции АВО

Другой расчетный модуль Xist позволяет выполнить расчет теплообмена в кожухотрубчатых теплообменниках. Основная особенность этого модуля – это возможность выбора типа кожуха, крышек из спецификации ТЕМА, а также вида и количества перегородок. Но у этого метода основным недостатком является отсутствие возможности расчета и задания граничных параметров системы вентиляции.

В данной работе предлагается использование совершенно нового подхода в виде сочетания вышеуказанных методов, который позволит рассчитать различные вариации конструктивного исполнения теплообменной секции АВО и оптимизировать её с точки зрения энергоэффективности.



Разработанная методика расчета включает следующие этапы:

- на первом этапе проводится оценочный расчет аппарата воздушного охлаждения в программном модуле Xase с целью получения следующих показателей в первой итерации: перепад давления в трубном и межтрубном пространстве, а также предельный расход воздуха для текущей конфигурации вентиляционного оборудования, которые можно взять как граничные условия для осуществления второй итерации расчетов в программном комплексе Xist, а также максимально возможные коэффициенты теплоотдачи с воздушной и трубной сторон при существующем конструктиве аппарата;

- на втором этапе проводится расчет в программном комплексе Xist, в котором задаются следующие граничные условия: температура охлаждаемого потока на входе / выходе из аппарата, температура воздуха на входе, расходы воздуха и охлаждаемого продукта, допустимое значение перепада по межтрубному пространству, а также количество и размер секционирующих перегородок;

- на третьем этапе проводится оценочное исследование энергоэффективности новой конструкции теплообменной секции АВО по двум предложенным симплексам подобия: гидродинамической затратности  $A_1$  и энергетической эффективности  $B_1$ .

Для оценки увеличения потребляемой мощности вентиляторами был предложен симплекс подобия гидродинамической затратности  $A_1$ , показывающий увеличение перепада давления по воздушной стороне с увеличением количества секционирующей перегородок:

$$A_1 = \frac{N_i}{N_0}, \quad (1)$$

где  $N_0$  – это мощность, потребляемая вентиляторами при отсутствии секционирующих перегородок,  $N_i$  – это мощность, потребляемая вентиляторами при количестве секционирующих перегородок  $i$ .

Для определения оптимального количества перегородок был предложен симплекс подобия энергетической эффективности  $B_1$ , показывающий увеличение коэффициента теплопередачи с увеличением количества секционирующей перегородок:

$$B_1 = \frac{K_i}{K_0}, \quad (2)$$

где  $K_0$  – это коэффициент теплопередачи в аппарате при отсутствии секционирующих перегородок,  $K_i$  – это коэффициент теплопередачи в аппарате при количестве секционирующих перегородок  $i$ .

После проведения серии численных экспериментов были проанализированы перепад давления по воздушной стороне, потребляемая вентиляторами мощность, коэффициент теплопередачи при различном количестве секционирующих перегородок (Таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение повышения коэффициента теплопередачи и потребляемой мощности вентиляторами при изменении конструктивного оформления трубного пучка (расход воздуха – 396,7 м<sup>3</sup>/ч)

Количество секционирующих перегородок	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Перепад по воздушной стороне, кПа	2,165	2,284	2,409	2,527	2,643	2,764	2,893	3,033	3,192	3,365	3,577
Расчетная мощность, потребляемая вентиляторами, кВт	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,52	0,55
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> *К)	19,41	49,97	56,27	60,91	64,74	68,03	71,02	73,69	75,96	77,98	79,98

Далее были рассчитаны значения симплекса подобия гидродинамической затратности  $A_1$  и симплекса подобия энергетической эффективности  $B_1$  для различного числа перегородок.

После этого было рассчитано снижение затрат на конструкцию  $ZK_i$ :

$$ZK_i = \frac{ZK_0}{B_i \times \tau_3}, \quad (3)$$

где  $ZK_0$  – стоимость исходного АВО (без секционирующих перегородок),  $B_i$  – симплекс подобия энергетической эффективности при количестве секционирующих перегородок  $i$ ,  $\tau_3$  – время эксплуатации аппарата.

Также было рассчитано повышение затрат на перекачку  $ZП_i$ :

$$ZП_i = 8000 \times ZП_0 \times A_i \times P, \quad (4)$$

где  $ZП_0$  – исходные затраты на перекачку (без секционирующих перегородок),  $A_i$  – симплекса подобия гидродинамической затратности при количестве секционирующих перегородок  $i$ ,  $P$  – стоимость электроэнергии за кВт.

В результате был построен график целевой функции  $R = ZK_i + ZП_i$  (Рисунок 3).



Рисунок 3 - График целевой функции R

Учитывая данные, представленные в Таблице 1, можно сделать вывод о том, что добавление секционирующих перегородок в АВО позволяет повысить теплообменную эффективность. Как видно из графика, представленного на Рисунке 3, оптимальное количество секционирующих перегородок, определённое в рамках численного исследования, составило три единицы. При этом количестве перегородок происходит увеличение коэффициента теплопередачи в 3,1 раз, а потребляемая вентиляторами мощность увеличивается не более чем на 17,2%.

**Четвёртая глава** посвящена совершенствованию контактных массообменных устройств тарельчатого и насадочного типа. В данной главе приведены результаты экспериментальных исследований клапанной тарелки с полноподъемным клапаном, а также результаты расчётных исследований массообменных устройств с помощью CFD-анализа в Ansys CFX для двухфазной среды: проведена оценка влияния установки Г-образного отбойника на режим работы ситчатой тарелки, выполнена оценка влияния ориентации гофр в блоках ПТН на гидравлические характеристик и определены области применения орошаемых ПТН различных типов.

Исследование работы клапанной тарелки с полноподъемным клапаном проводилось на системе «вода-воздух» в следующем широком диапазоне режимных параметров: фактор на сечение стэнда  $F = 0,5 - 2,8 \text{ Па}^{0,5}$ , нагрузка по жидкости  $L_v = 2,5 - 120 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ .

Наблюдая за работой исследуемой тарелки по мере увеличения скорости газа и жидкости, в колонне установлены следующие основные режимы / переходные точки: режим провала жидкости, нижняя граница устойчивой работы тарелки, барботажный режим, верхняя граница устойчивой работы тарелки, режим уноса. Далее была построена область устойчивой работы клапанной тарелки с круглым полноподъемным клапаном, показанная на Рисунке 4.

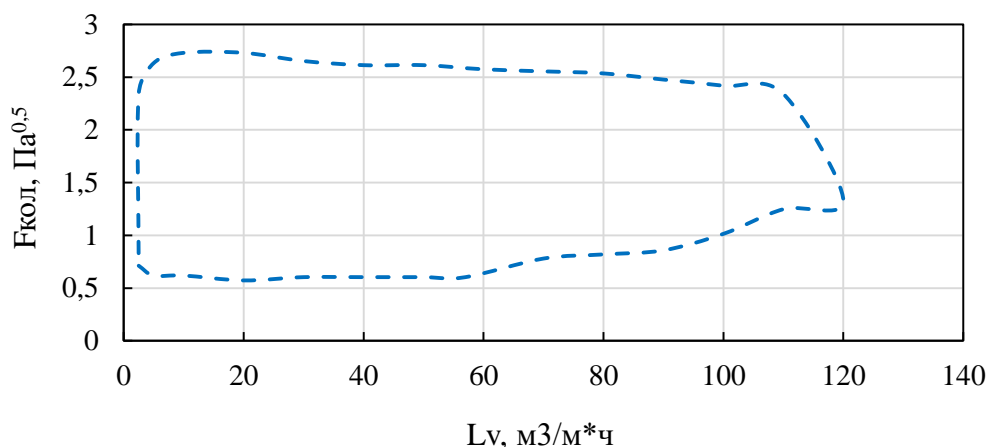


Рисунок 4 – Область устойчивой работы клапанной тарелки с круглым полноподъемным клапаном

Диапазон устойчивой работы для клапанной тарелки с круглым полноподъемным клапаном был рассчитан, исходя из отношения максимальной и минимальной скоростей газа при различных жидкостных нагрузках, и в среднем составил  $n = 3,5$ . Таким образом, можно сделать вывод, что клапанная тарелка с круглым полноподъемным клапаном работает в широком диапазоне по газу при жидкостных нагрузках от 5 до  $110 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$  без явлений уноса, либо провала жидкости. На Рисунке 5 для сравнительного анализа приведены области устойчивой работы клапанных тарелок с круглым полноподъемным клапаном и клапаном со смещенным центром тяжести («хромоножка»).

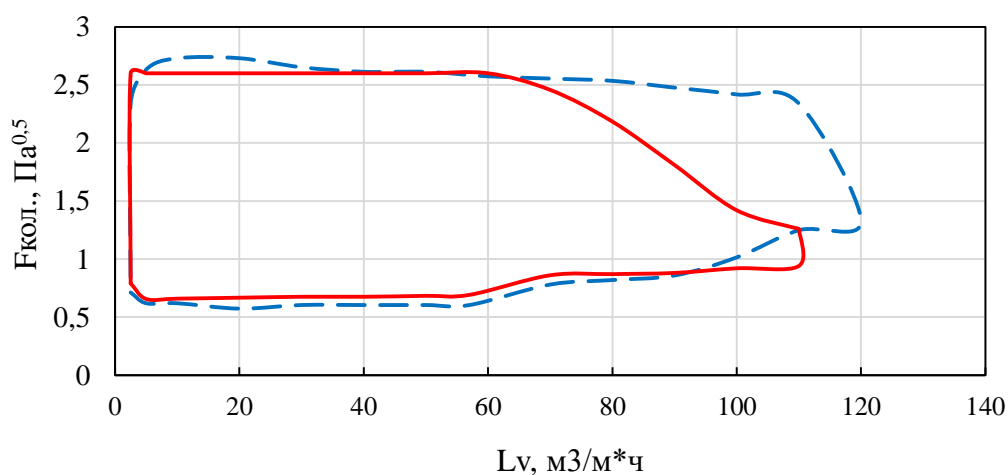
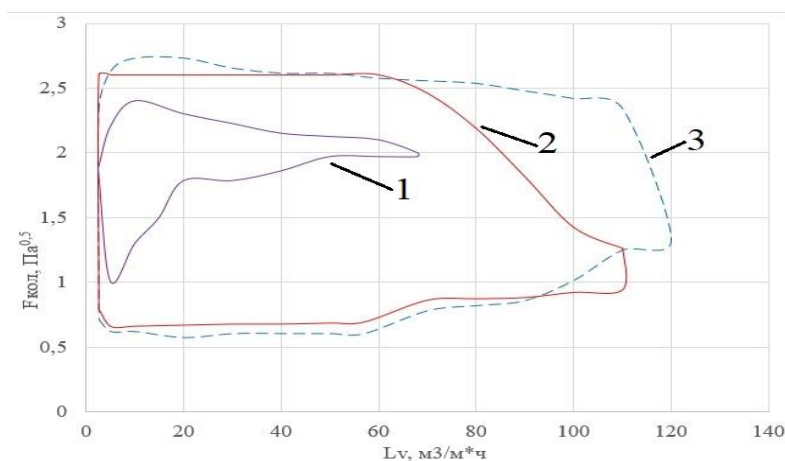


Рисунок 5 – Сравнение областей устойчивой работы клапанных тарелок с различными клапанами

Из сравнительного анализа видно, что клапанная тарелки с круглым полноподъемным клапаном (пунктирная линия) позволяет работать при нагрузке по жидкости большей на 20% и при нагрузке по пару большей на 80% в области нагрузок по жидкости от 90 до  $120 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$  по сравнению с клапанной тарелкой с круглым клапаном с смещенным центром тяжести (сплошная линия). Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что применение клапана с

равновеликими ножками позволяет расширить область устойчивой работы, и, соответственно, область применения клапанных тарелок.

Также было выполнено исследование гидродинамических режимов работы ситчатой тарелки. Исследование работы ситчатой тарелки проводилось на системе «вода-воздух» в широком диапазоне режимных параметров. По результатам проведенного эксперимента была построена область устойчивой работы исследуемой ситчатой тарелки, и далее выполнен сравнительный анализ с областями устойчивой работы клапанных тарелок с круглыми полноподъемными клапанами и клапанами со смещенным центром тяжести (Рисунок 6).



1 - область устойчивой работы исследуемой ситчатой тарелки, 2 - область устойчивой работы клапанной тарелки с круглым клапаном со смещенным центром тяжести, 3 - область устойчивой работы клапанной тарелки с круглым полноподъемным клапаном

Рисунок 6 – Области устойчивой работы исследуемой ситчатой тарелки и клапанных тарелок

Наибольший диапазон устойчивой работы для ситчатой тарелки наблюдается при удельных жидкостных нагрузках на уровне  $10 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ :  $n = 2,4$ . В режимах с удельными жидкостными нагрузками более  $45 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$  диапазон устойчивой работы составляет менее 1,15. Таким образом, можно сделать вывод, что ситчатая тарелка хорошо работает только на небольших жидкостных нагрузках. При жидкостных нагрузках более  $45 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$  наблюдается неустойчивая работа тарелки: даже при небольших изменениях режима колонны будут наблюдаться унос либо провал жидкости.

Для расширения диапазона устойчивой работы исследуемой тарелки предлагается к установке над полотном Г-образный каплеотбойник, установка которого позволит образовать контролируемую зону барботаж, снизить унос жидкости на вышележащую ступень с потоками газа. На первом этапе исследований была проведена разработка моделей ситчатой тарелки и ситчатой тарелки с Г-образным каплеотбойником и далее проведена оценка адекватности модели при помощи сравнения полученных значений перепада давления на ситчатой тарелке в среде Ansys CFX и в результате эксперимента на испытательном стенде. Результаты приведены в Таблице 2.

Как видно из представленных данных расхождения в значениях, полученных экспериментальным и расчетным путем, не превышают 11 %. Это позволяет говорить о точности выполняемых расчетов и адекватности построенной численной модели для выполнения на её базе исследований гидродинамики ситчатой тарелки с добавлением Г-образного каплеотбойника без проведения экспериментов на реальном оборудовании.

Таблица 2 – Сравнительная таблица экспериментальных и расчетных значений перепада давления на ситчатой тарелке при напряженности слива  $L_v = 20 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$

Параметр	Скорость газа на сечение стенда, м/с				
	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75
Экспериментальные значения перепада давления, мм рт. ст.	3,24	4,21	5,18	6,12	7,48
Расчетные значения перепада давления, мм рт. ст.	3,52	4,49	5,73	6,48	7,76

На втором этапе нами было выполнено сравнительное исследование ситчатой тарелки с Г-образным отбойником и без него для режимов, в которых происходит унос. В Таблице 3 представлены полученные расчетные значения перепада давления для двух расчетных режимов.

Таблица 3 – Расчетные значения перепада давления на ситчатой тарелке с Г-образным отбойником и без него при напряженности слива  $L_v = 95 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$

Параметр	Скорость газа на сечение стенда, м/с	
	1,25	1,50
Перепад давления на ситчатой тарелке, мм рт. ст.	7,15	8,23
Перепад давления на ситчатой тарелке с Г-образным каплеотбойником, мм рт. ст.	8,70	10,29

Как видно из представленных данных увеличение перепада давления при установке отбойника не превышает 25 %. На Рисунке 7 представлено распределение скоростей жидкости (распределение скоростей потоков газа не показано для наглядности отображения эффекта от установка Г-образного каплеотбойника).

Методами численного моделирования в среде ANSYS проведена оценка снижения капельного уноса над ситчатой тарелкой после установки Г-образного каплеотбойника. Было показано, что количество жидкости, которое уносится с потоком газа на вышележащую ступень, снизилось на 85% (при анализе распределения скоростей жидкости на полотне тарелки), при этом увеличение перепада давления при установке отбойника не превысило 25%.

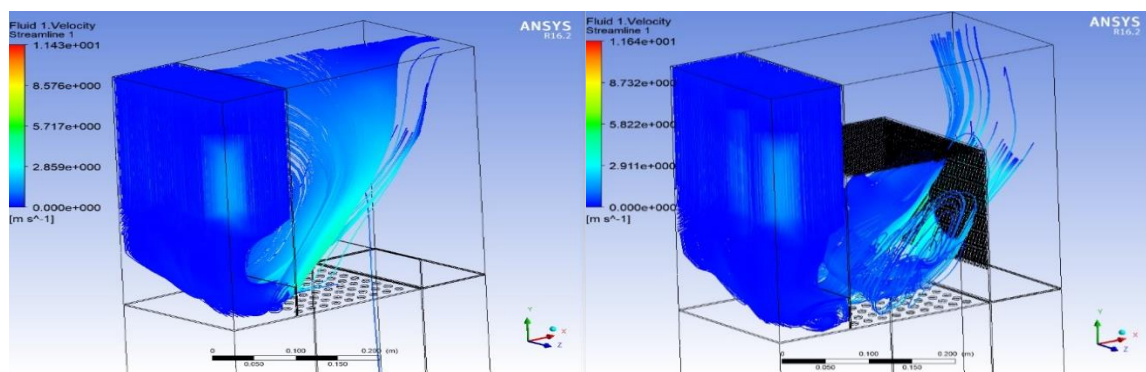


Рисунок 7 – Распределение скоростей потоков жидкости на ситчатой тарелке и на ситчатой тарелке с Г-образным отбойником

В следующем разделе представлены результаты исследований гидродинамических характеристик орошаемых перекрестноточных насадочных блоков, состоящих из просечно-вытяжных гофрированных листов, в которых гофра расположена вертикально (I типа) и горизонтально (II типа) по ходу движения газа. На Рисунке 8 представлены разработанные модели блоков ПТН I и II типа для проведения CFD-анализа.

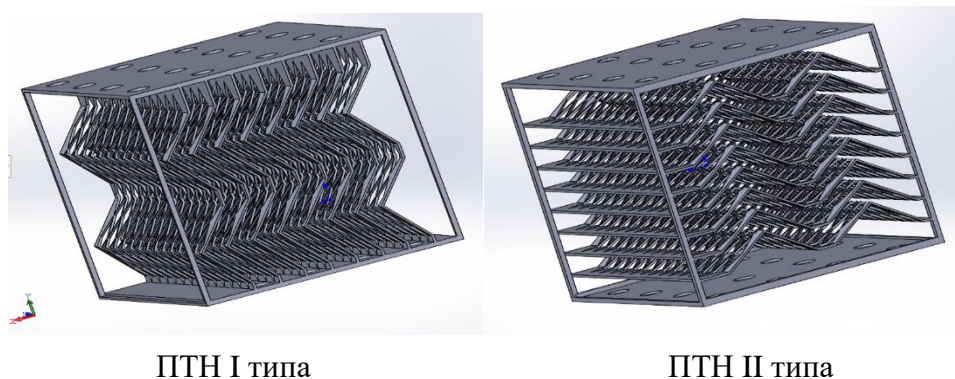


Рисунок 8 – Разработанные модели блоков ПТН I и II типа для проведения CFD-анализа

Для проверки адекватности разработанной численной модели на первом этапе было выполнено сравнение результатов экспериментов, проводимых на испытательном стенде по определению гидродинамических характеристик в условиях взаимодействия воды и воздуха на перекрестноточных насадочных блоках с вертикальной ориентацией гофр с данными, полученными в среде Ansys CFX. Результаты приведены на Рисунке 9.

Как видно из представленных данных расхождения в значениях, полученных экспериментальным и расчетным путем, не превышают 12%. Это позволяет сделать вывод об адекватности построенной модели и точности выполненных расчетов и адекватности построенной численной модели для выполнения на её базе исследований гидродинамики перекрестноточных насадочных блоков другой конструкции без проведения экспериментов на реальном оборудовании.

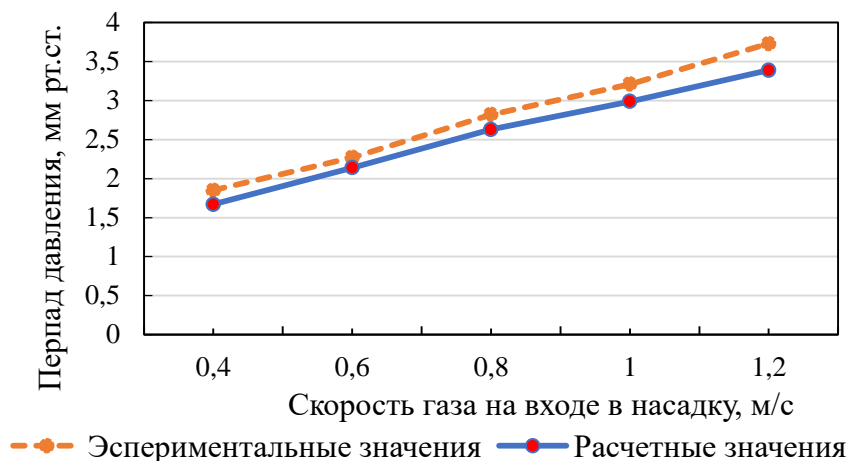


Рисунок 9 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений перепада давления при различных скоростях газа на входе в насадку и скорости жидкости 0,1 м/с

На втором этапе было выполнено сравнительное исследование блоков насадки с вертикальной (тип I) и горизонтальной (тип II) ориентацией гофр в широком диапазоне расходов газа (F-фактор в насадке от 1 до 3 Па<sup>0,5</sup>) и жидкости (плотность орошения от 25 до 300 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч) на различных средах: этан-этиленовая и пропан-пропиленовая фракция в колонне выделения этан-этиленовой фракции К-205 установки ЭП-60 ПАО «Уфаоргсинтез», керосиновой фракция в укрепляющей секции колонны К-2, отбензиненная нефть в отгонной секции колонны К-2 установки АВТ-4 ПАО АНК «Башнефть» «Башнефть-Уфанефтехим». На Рисунках 10 и 11 представлены графики, на которых отражены значения перепадов давления на насадках I и II типа при различных расходах газа и жидкости.

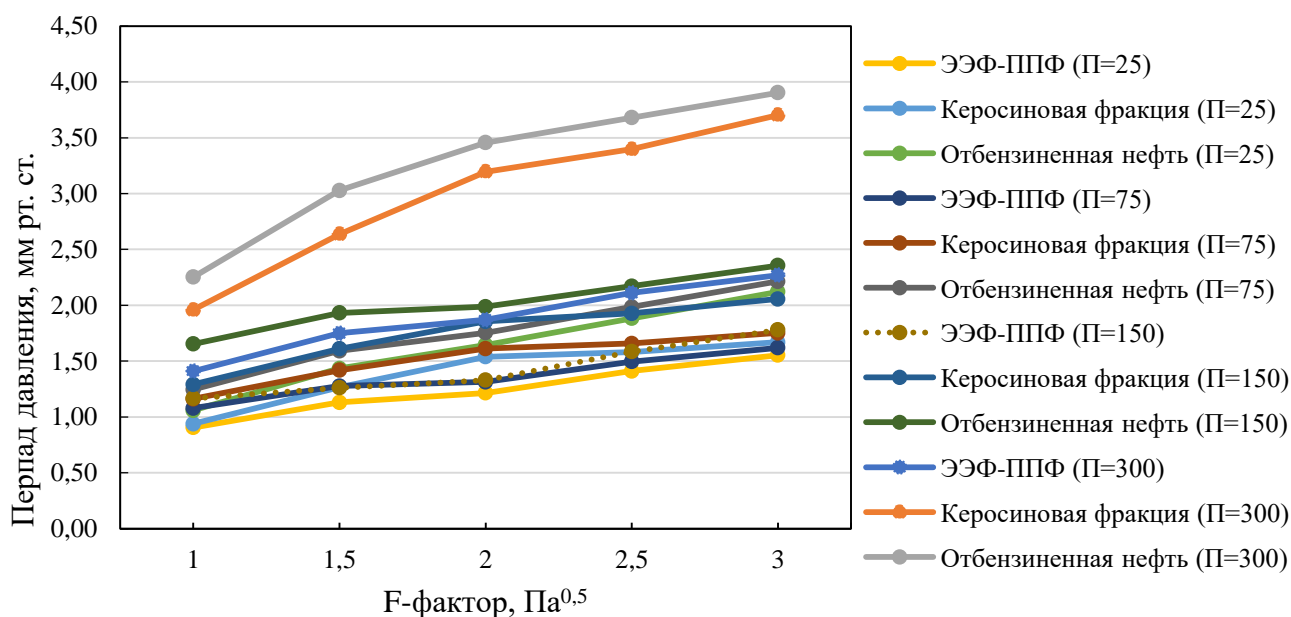


Рисунок 10 – Значения перепада давления на различных средах в ПТН с вертикальной ориентацией гофр с плотностями орошения от 25 до 300 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч



Как видно из представленных расчетных значений перепада давления на Рисунках 10 и 11 перепад давления на насадке II типа в 1,1-2 раза меньше, чем на насадке I типа. Также вышепредставленные значения позволяют судить о том, что при неизменной нагрузке по газу при увеличении нагрузки по жидкости от 25 до 300 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч, перепад давления расчет как на насадке I типа, так и на насадке II типа. При этом характер увеличения перепада давления схож для ПТН вертикального и горизонтального типов.

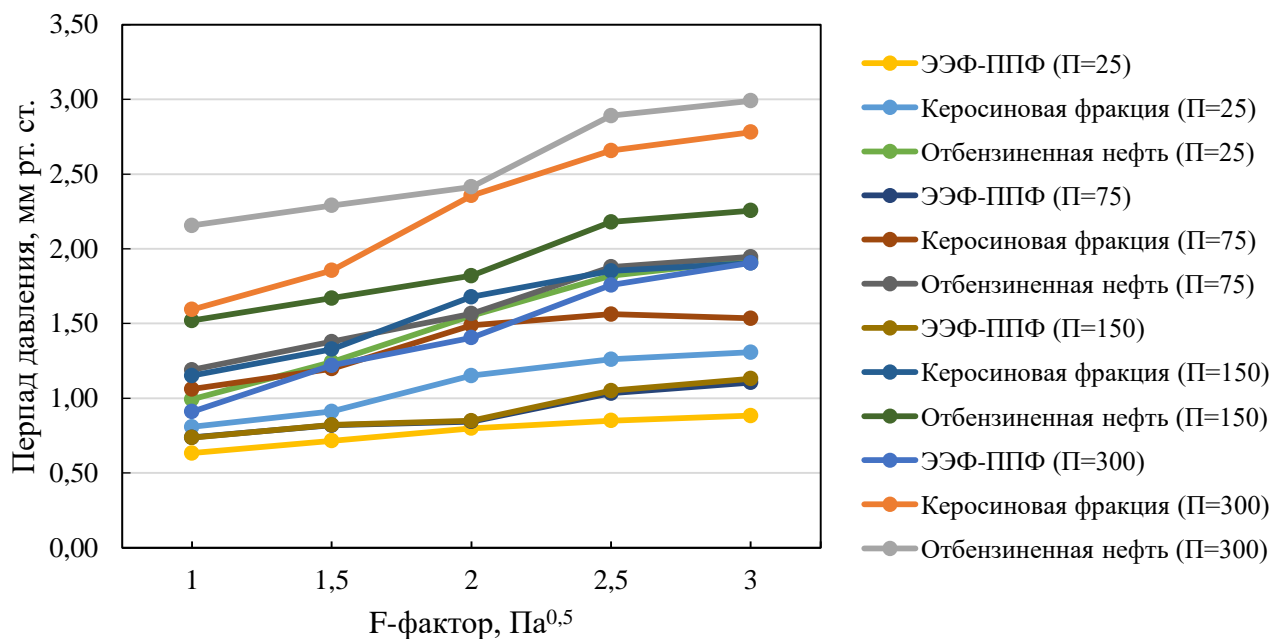


Рисунок 11 – Значения перепада давления на различных средах в ПТН с горизонтальной ориентацией гофр с плотностями орошения от 25 до 300 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч

В рамках данной работы также было проведено исследование влияния соотношения плотности жидкости к плотности газа рабочей среды на перепад давления в ПТН различной конструкции, распределения газовой и жидкой фаз в контактном элементе, а также оценки влияния на характер уноса жидкости с газом на вышележащую ступень при вертикальной и горизонтальной ориентации гофр.

По результатам проведенных исследований после анализа полученных данных был сделан вывод о том, что в колонне выделения этан-этиленовой фракции К-205, где соотношение плотностей жидкости и газа равно 7,2, перепад давления в среднем в ПТН I и II типа при различных плотностях орошения в 1,5 – 2,5 раза меньше, чем в отгонной секции колонны К-2, где это соотношение составляет 269. Это позволяет судить о том, что при увеличении соотношения плотности жидкости к плотности пара в рабочей среде увеличивается перепад давления в перекрестноточном насадочном контактном элементе независимо от ориентации гофр. Для оценки влияния соотношения плотности жидкости к плотности газа рабочей среды на характер уноса жидкости с газом на вышележащую ступень при вертикальной и горизонтальной ориентации гофр был использован модуль «streamline» в системе постпроцессинга. Было установлено, что при увеличении соотношения плотностей жидкости и

газа рабочей среды происходит увеличение сноса жидкости с насадочного блока. Так, в колонне выделения этан-этиленовой фракции К-205, где соотношение плотностей жидкости и газа равно 7,2, снос жидкости меньше до 2,5 раз, чем в отгонной секции колонны К-2, где это соотношение составляет 269, при одинаковых удельных паровых и жидкостных нагрузках. Это позволяет судить о том, что при увеличении соотношения плотности жидкости к плотности пара в рабочей среде происходит увеличения сноса жидкости с насадочного блока независимо от ориентации гофр.

Далее в системе постпроцессинга был использован модуль «contour» для проведения графической интерпретации и анализа распределения потоков газовой и жидкой фаз (Рисунки 12-15), средних скоростей газа в насадке при различных средах в перекрестноточных насадочных блоках I и II типа.

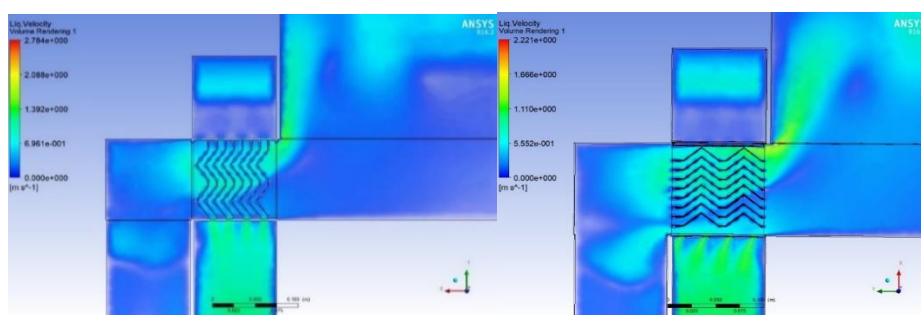


Рисунок 12 – Распределение скоростей газа и жидкости (ЭЭФ - ППФ) в блоках ПТН с вертикальной и горизонтальной ориентацией гофр при  $F_{нас} = 3 \text{ Па}^{0,5}$ ,  $\Pi = 150 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$

Серия исследований, проведенных на средах с близкими значениями плотности газа и жидкости (ЭЭФ-ППФ), показала, что в целом распределение потоков схожее (см. Рисунок 12), но средняя скорость потока газа в насадке на 22% выше в ПТН с вертикальной ориентацией гофр, что характеризует меньшее время пребывания в насадке по сравнению с ПТН с горизонтальной ориентацией гофр. При этом количество жидкости, поступающей в нижний распределитель, больше на 25% в ПТН с вертикальной ориентацией гофр, что характеризует меньший снос жидкости из насадки. По результатам расчетных экспериментов установлено, что характер распределения сред в ПТН в среде ЭЭФ-ППФ с различной конструкцией относительно схож.

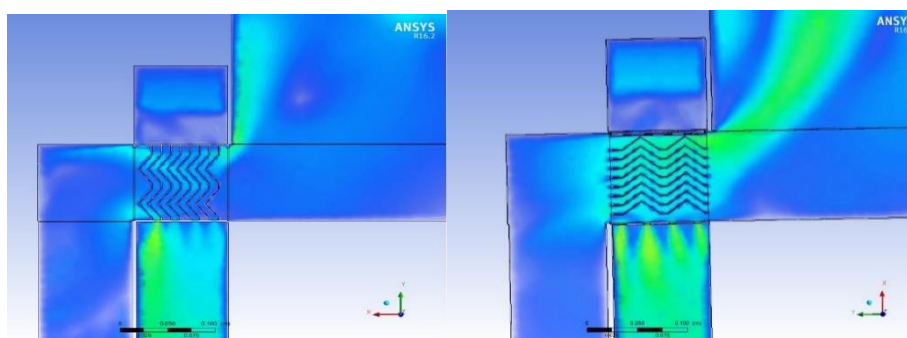


Рисунок 13 – Распределение скоростей газа и жидкости (керосиновая фракция) в блоках ПТН с вертикальной и горизонтальной ориентацией гофр при  $F_{нас} = 3 \text{ Па}^{0,5}$ ,  $\Pi = 25 - 75 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$

Серия расчетных экспериментов при умеренном значении плотности орошения (до  $75 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ) показала, что распределение жидкости происходит более равномерно в ПТН с горизонтальной ориентацией гофр (см. Рисунок 13). Хочется отметить, что при плотности орошения от  $25$  до  $75 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$  характер распределения жидкости практически не меняется как в ПТН I типа, так и в ПТН II типа. Это характеризуется тем, что количество жидкости, поступающей в нижний распределитель, практически не изменяется (расхождение менее 1%), что свидетельствует об устойчивой работе контактных устройств в пределах удельных нагрузок по жидкости от  $25$  до  $75 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$  при относительно высокой нагрузке по газу ( $3 \text{ Па}^{0,5}$ ). Также стоит отметить, что средняя скорость газа в насадке при этом выше на 50% в насадке с вертикальной ориентацией гофр, что характеризует меньшее время пребывания в насадке по сравнению с ПТН с горизонтальной ориентацией гофр. При этом количество жидкости, поступающей в нижний распределитель, всего на 9% ниже в ПТН II типа. На основании вышесказанного можно сделать вывод о том, что при высоких удельных нагрузках по газу и умеренных нагрузках по жидкости более предпочтительно использование ПТН II типа.

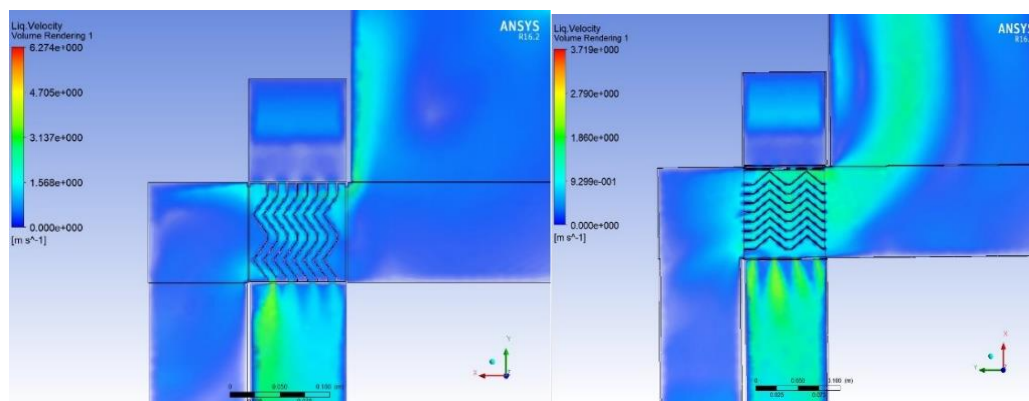


Рисунок 14 – Распределение скоростей газа и жидкости (керосиновая фракция) в блоках ПТН с вертикальной и горизонтальной ориентацией гофр при  $F_{нас} = 3 \text{ Па}^{0,5}$ ,  $\Pi = 150 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$

Из Рисунка 14 видно, что при увеличении плотности орошения до  $150 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$  количество жидкости, поступающей в нижний распределитель, больше на 19% в ПТН с вертикальной ориентацией гофр, что характеризует меньший снос жидкости из насадки по сравнению с ПТН с горизонтальной ориентацией гофр. При дальнейшем увеличении плотности орошения количество жидкости, поступающей в нижний распределитель, уменьшается в каждом типе ПТН. При этом в ПТН с горизонтальной ориентацией гофр количество жидкости, поступающей в нижний распределитель, гораздо меньше. По результатам расчетных экспериментов установлено, что характер распределения сред в ПТН в среде керосиновой фракции с различной конструкцией отличается. В ПТН с горизонтальной ориентацией наблюдается более равномерное распределение жидкости по высоте насадки. В тоже время ПТН с вертикальной ориентацией гофр гораздо больше подходят для высоких удельных нагрузок, т.к. количество жидкости, поступающей на нижний ряд распределителей выше до 30% по сравнению с ПТН с горизонтальной ориентацией гофр.

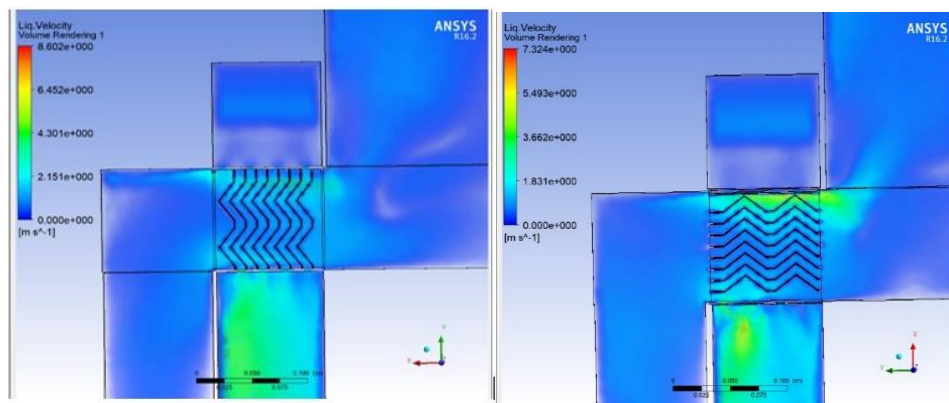


Рисунок 15 – Распределение скоростей газа и жидкости (отбензиненная нефть) в блоках ПТН с вертикальной и горизонтальной ориентацией гофр при  $F_{нас} = 3 \text{ Па}^{0,5}$ ,  $\Pi = 300 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$

Серия исследований, проведенных при сверхвысоких значениях плотности орошения (до  $300 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ), показала, что в ПТН с горизонтальной ориентацией гофр происходит снос до 80% жидкости без её поступления в нижний ряд распределителя по сравнению с ПТН с вертикальной ориентацией гофр (см. Рисунок 15). Из этого можно сделать вывод, что ПТН с вертикальной ориентацией гофр гораздо более подходит для сверхвысоких удельных нагрузок по жидкости по сравнению с ПТН с горизонтальной ориентацией гофр.

В результате обобщения расчетных исследований ПТН с различной ориентацией гофр в среде Ansys CFX были определены их области применения: насадка с горизонтальной ориентацией гофр (II типа) больше подходит для высоких удельных нагрузок по газу при умеренных нагрузках по жидкости, так как при этих условиях распределение жидкости в ней происходит более равномерно, больше время пребывания среды в насадке и ниже перепад давления; насадка с вертикальной ориентацией гофр (II типа) больше подходит для высоких удельных жидкостных нагрузок, так как в ней количество жидкости, вынесенной из блока насадки на вышележащую ступень, ниже на 80% по сравнению с ПТН с горизонтальной ориентацией гофр.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен принцип продольного секционирования межтрубного пространства, который позволяет реализовать наиболее эффективную противоточную организацию взаимодействия фаз в теплообменной секции аппарата воздушного охлаждения. Получен патент «Аппарат воздушного охлаждения с секционирующими перегородками» № 200615 (РФ) МПК F28D 21/00. Разработана методика, при помощи которой было определено оптимальное число секций в межтрубном пространстве аппаратов воздушного охлаждения с учетом изменения энергетических и гидродинамических характеристик аппарата.

Разработанная конструкция аппарата позволяет:

- реализовать противоточную схему взаимодействия охлаждаемой среды и атмосферного воздуха, являющаяся наиболее эффективной с точки зрения теории теплообмена;

- увеличить общий коэффициент теплопередачи процесса охлаждения в аппарате за счет увеличения времени контакта холодного воздуха с охлаждаемой средой, что позволяет уменьшить требуемую поверхность теплообмена, и, следовательно, снизить количество требуемых аппаратов и улучшить массогабаритные характеристики.

2. Экспериментальным путём получена область устойчивой работы для нового типа клапанных тарелок с полноподъемным круглым клапаном. Сравнительный анализ показал, что клапанная тарелка с круглым полноподъемным клапаном позволяет работать при нагрузке по жидкости большей на 20% и при нагрузке по пару большей на 80% в области нагрузок по жидкости от 90 до 120 м<sup>3</sup>/(м·ч) по сравнению с клапанной тарелкой с круглым клапаном с смещенным центром тяжести. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что применение клапана с равновеликими ножками позволяет расширить область устойчивой работы, и, соответственно, область применения клапанных тарелок. Разработано ТУ 3611-002-12752969-19 "Массообменные контактные устройства "РЕТОН" тарельчатого типа. Разработана программа, предназначенная для расчета и подбора клапанных тарелок с полноподъемным клапаном. Получено свидетельство о регистрации программы на ЭВМ № 2020663958. Получены патент на изобретения «Массообменная тарелка» №2738591 (РФ) МПК В01D 3/26 и «Клапанная тарелка массообменной колонны» № 2744742 (РФ) МПК В01D 3/16, В01J 19/32. Осуществлено внедрение клапанной тарелки с полноподъемным круглым клапаном в колонне стабилизации установки риформинга Л-35/11-600 АО «Газпромнефть-ОМПЗ». Получен акт выполненных работ.

3. Разработано и исследовано методом численного моделирования в среде ANSYS CFX Г-образное каплеотбойное устройство, позволяющее значительно расширить область устойчивой работы тарельчатых контактных устройств. На примере ситчатой тарелки было показано, что количество жидкости, которое уносится с потоком газа на вышележащую ступень, снизилось на 85% (при анализе распределения скоростей жидкости на полотне тарелки), при этом увеличение перепада давления при установке отбойника не превысило 25%.

4. Впервые на двухфазной системе газ-жидкость в среде ANSYS CFX проведен сравнительный анализ конструктивного оформления перекрестноточных насадочных блоков с различной ориентацией гофр (I тип – вертикальное расположение; II тип – горизонтальное), который показал, что:

- разница по перепаду давления между насадками с различной ориентацией гофр при различных расходах газа отличается от 1,1 до 2 раз (чем больше скорость газа, тем больше разница) в сторону увеличения перепада на насадке с вертикальной ориентацией гофр в зависимости от среды, что позволяет говорить о том, что применение насадки II типа позволит снизить общий перепад по колонне, тем самым повысить энергоэффективность;

- средняя скорость отдельных потоков газа в насадке II типа меньше в среднем на 10-50% (в зависимости от среды), чем в насадке I типа, что говорит об увеличении времени пребывания среды в насадке и в соответствии с основным уравнением массопередачи позволяет выдвинуть предположение о более высокой эффективности процесса массопереноса;

- при увеличении соотношения плотности жидкости к плотности пара в рабочей среде

при одинаковых удельных нагрузках происходит увеличения сноса жидкости с насадочного блока независимо от ориентации гофр.

- насадка с горизонтальной ориентацией гофр (II типа) больше подходит для высоких удельных нагрузок по газу при умеренных нагрузках по жидкости, так как при этих условиях распределение жидкости в ней происходит более равномерно, а также при этом в ней ниже значение скорости газа, характеризующее большее время пребывания среды в насадке, и ниже перепад давления, в тоже время насадка с вертикальной ориентацией гофр (II типа) больше подходит для высоких удельных жидкостных нагрузок, так как в ней количество жидкости, вынесенной из блока насадки на вышележащую ступень, ниже на 80% по сравнению с ПТН с горизонтальной ориентацией гофр.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих научных трудах:  
в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ**

1. Лесной, Д.В. Методика расчета теплообменной эффективности для новых технических решений по совершенствованию конструкции аппаратов воздушного охлаждения / Д.В. Лесной, С.К. Чуракова // Башкирский химический журнал. – 2020. – Т.28, № 3. – С. 97-102.

2. Лесной, Д.В. Исследование гидродинамических характеристик орошаемых перекрестноточных насадочных блоков различной конструкции / Д.В. Лесной, С.К. Чуракова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2021. – №1. – С. 28-31.

3. Лесной, Д.В. Повышение теплообменной эффективности аппаратов воздушного охлаждения за счет установки секционирующих перегородок / Д.В. Лесной, С.К. Чуракова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2021. – №2. – С. 12-15.

**В патентах**

4. Патент № 200615 Российская Федерация, Аппарат воздушного охлаждения с секционирующими перегородками // Лесной Д.В., Чуракова С.К.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Уфимский государственный нефтяной технический университет. – № 2020126411; заявл. 04.08.2020; опубл. 02.11.2020.

5. Патент № 2738591 Российская Федерация, Массообменная тарелка // Мнушкин И.А., Лесной Д.В.; заявитель и правообладатель Мнушкин Игорь Анатольевич. – № 2019136375; заявл. 13.11.2019; опубл. 14.12.2020.

6. Патент № 2744742 Российская Федерация, Клапанная тарелка массообменной колонны // Мнушкин И.А., Лесной Д.В.; заявитель и правообладатель Мнушкин Игорь Анатольевич. – № 2020122674; заявл. 09.07.2020; опубл. 15.03.2021.

**В программе на ЭВМ**

7. Свидетельство о регистрации программы на ЭВМ № 2020663958 «Программа по расчету клапанной тарелки с полноподъемным клапаном»: программа для ЭВМ / Д.В. Лесной, С.К. Чуракова, правообладатели Д.В. Лесной, С.К. Чуракова, заявл. 22.09.2020 № 2020661021; опубл. 05.11.2020.

**В учебном пособии**

8. Лесной, Д.В. Расчет и подбор аппаратов воздушного охлаждения: учеб. пособие / Д.В. Лесной, С.К. Чуракова, Т.Р. Просочкина, Ф.Ш. Вильданов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. – 98 с.

**В материалах международных научно-практических конференций**

9. Лесной, Д.В. Расчет скорости воздуха в узком сечении на сухой ситчатой тарелке провального типа / Д.В. Лесной, С.К. Чуракова // 71 всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. Сборник материалов конференции. – Ярославль, 2018. – С. 339-344.

10. Лесной, Д.В. Начальные этапы исследования конструкции перекрестноточных насадочных элементов в среде Ansys CFX / Д.В. Лесной, С.К. Чуракова // Актуальные проблемы науки и техники – 2018: сборник статей, докладов и выступлений XI Международной научно-практической конференции молодых ученых. – Уфа, 2018 – Том 2, С.133-137.

11. Чуракова, С.К. Область эффективной работы клапанной тарелки с круглым полноподъемным клапаном / С.К. Чуракова, Д.В. Лесной, Т.И. Маннанов // Материалы III Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения». – Краснодар, 2019. – С.153-155.

12. 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 // Материалы III Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения». – Краснодар, 2019. – С.85-88.

13. Чуракова, С.К. Исследовательский стенд для определения областей устойчивой работы контактных устройств фракционирующего оборудования / С.К. Чуракова, Д.В. Лесной, Т.И. Маннанов, Е.К. Константинов, К.А. Муллабаев // Материалы Всероссийской научно-практической конференции Волго-Уральский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа «Новые направления работ на нефть и газ, инновационные технологии разработки их месторождений, перспективы добычи нетрадиционного углеводородного сырья». – Оренбург, 2019. – С. 172-174.

14. 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 // Материалы Всероссийской научно-практической конференции Волго-Уральский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа «Новые направления работ на нефть и газ, инновационные технологии разработки их месторождений, перспективы добычи нетрадиционного углеводородного сырья». – Оренбург, 2019. – С. 175-178.

15. Константинов, Е.К. Метод расчета гидравлических характеристик сложных гидродинамических систем / Е.К. Константинов, С.К. Чуракова, Д.В. Лесной, Т.И. Маннанов, К.А. Муллабаев // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения». – Краснодар, 2020. – С.117-120.

16. Лесной, Д.В. Исследование влияния изменений конструктивных характеристик аппаратов воздушного охлаждения на капитальные и эксплуатационные затраты / Д.В. Лесной, С.К. Чуракова, Т.И. Маннанов, Е.К. Константинов, К.А. Муллабаев // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения». – Краснодар, 2020. – С.130-133.

17. 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 // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения». – Краснодар, 2020. – С.134-137.

18. 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 // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения». – Краснодар, 2020. – С.159-165.