

На правах рукописи



ФАИЗОВ АЗАМАТ РАМИЛЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТУРНОГО
ОФОРМЛЕНИЯ ФРАКЦИОНИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ И СХЕМ
РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ**

Специальность 05.17.07

«Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Уфа 2019

Работа выполнена на кафедре «Технология нефти и газа» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный
руководитель: доктор технических наук, доцент
Чуракова Светлана Константиновна

Официальные
оппоненты: **Дьячкова Светлана Георгиевна**
доктор химических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет» /
заведующий кафедрой химических технологий

Леонтьев Владимир Савельевич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
ЗАО «Безопасные технологии» /
заместитель технического директора

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

Защита диссертации состоится «25» сентября 2019 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.03 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

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

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Абдульминев Ким Гимадиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Массообменные процессы разделения многокомпонентных смесей требуют больших энергозатрат и их эффективность определяет экономику производства. В основе большинства методов разделения многокомпонентных смесей лежит работа фракционирующего оборудования, в частности ректификационных колонн. Поэтому в настоящее время для эффективного развития нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности большое внимание уделяется вопросам энергосбережения.

Как известно, основным элементом массообменного фракционирующего оборудования являются внутренние контактные устройства. По мере увеличения вычислительных способностей современных ЭВМ начался новый этап развития исследований в области оптимизации конструкции контактных устройств – трехмерное моделирование гидродинамических показателей массообменного процесса с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD моделирование). За рубежом CFD моделирование активно применяется для исследования работ противоточных насадок, и в этом плане представляет интерес исследование гидродинамики в перекрёстноточных насадочных контактных устройствах (далее перекрёстноточные насадки).

Степень разработанности темы исследования

Проблеме совершенствования процессов фракционирования многокомпонентных смесей и аппаратурного оформления фракционирующего оборудования посвящены работы многих российских и зарубежных учёных: Марушкин Б. К., Александров И.А., Богатых К.Ф., Мнушкин И.А., Чуракова С.К., Худайдатова Л.Б. Louis J. Thibodeaux, Douglas P. Harrison. Исследованию работы контактных устройств с использованием средств вычислительной гидродинамики посвящены работы следующих учёных: Ataki, Adel G, Attarakih, M. Seyyed Hossein Hosseini, Li Yang.

Цель работы

Разработка энергосберегающих технологий разделения многокомпонентных смесей путем совершенствования конструктивного оформления и технологических схем установок первичной и вторичной переработки нефти.

Поставленная цель достигается решением следующих задач: разработка энергосберегающих технологий с использованием комплексного подхода на основе совершенствования технологической схемы, использования высокоэффективных контактных устройств, совершенствования системы теплообмена, сниже-

ния доли рецикловых потоков; исследование гидравлического сопротивления различных типов перекрёстноточных насадочных контактных устройств на основе моделирования процесса в программе вычислительной гидродинамики Ansys Fluent; разработка и апробация новых программ для расчета тепло-массообменного и динамического оборудования.

Методы решения поставленных задач

Решение поставленных задач выполнено на основе: разработки энергосберегающей технологии для процессов фракционирования углеводородов первичной переработки нефти за счёт совершенствования схемных решений, конструктивного оформления контактных устройств в различных зонах ректификационных колонн и оптимизации системы теплообмена; разработки энергосберегающей технологии фракционирования углеводородов для процессов вторичной переработки нефти за счёт снижения рецикловых потоков и совершенствования системы теплообмена; оптимизации конструктивного оформления контактных устройств на основе CFD моделирования.

Научная новизна

1. На основе совершенствования работы фракционирующего оборудования разработаны новые энергосберегающие технологии для первичных и вторичных процессов переработки нефти.

2. Предложены формулы по расчёту коэффициента гидравлического сопротивления для двух типов перекрёстноточных насадочных контактных устройств: с направлением просечки параллельно направлению гофрирования; с направлением просечки перпендикулярно направлению гофрирования.

3. Разработана методика расчёта диаметра ректификационной колонны с перекрёстноточными насадочными контактными устройствами, учитывающая фактор паровой нагрузки в свободном сечении колонны.

Положения, выносимые на защиту

1. Технические решения по совершенствованию схемы фракционирования многокомпонентных смесей для установок первичной и вторичной переработки нефти.

2. Способ разделения продуктов изомеризации пентан-гексановой фракции, снижающий долю рецикловых потоков в системе.

3. Метод определения диаметра проектируемой колонны, оснащённой перекрестноточной насадкой.

4. Результаты расчётов гидродинамики перекрестноточных насадок в системе Ansys Fluent.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют формуле специальности 05.17.07: фундаментальные и прикладные исследования в области химии и технологий переработки жидких, газообразных и твердых топлив, в том числе нефти, нефтепродуктов, газовых конденсатов, газа, каменных углей, сланцев, торфа и продуктов их переработки, природных графитов, шунгитов, природных битумов. Область исследования – «Технологии и схемы процессов переработки нефтяного сырья на компоненты. Конструктивное оформление технологий и основные показатели аппаратуры установок для переработки сырья. Технологии подготовки нефти к переработке. Энергосберегающие технологии. Технологии приготовления товарных нефтепродуктов» (п. 2).

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработаны энергосберегающие технологии для предприятий нефтепереработки и нефтехимии, обеспечивающие следующие технико-экономические показатели для различных установок:

– для установки *первичной переработки нефти (АТ)*: увеличение производительности на 12,5 % (с 800 до 900 тыс. тонн в год), увеличение выхода светлых нефтепродуктов с 96,0 до 97,4 % от их потенциала в нефти и получение мазута с низким (5% об.) содержанием фракций, выкипающих до температуры 360 °С, при снижении удельного теплоподвода на 4,5%, получена справка о внедрении;

– для установки *вторичной переработки нефти (изомеризация Л-35/1)*: снижение энергозатрат в системе разделения продуктов при уменьшении доли рециркуловых потоков. По сравнению с фактической работой установки количество рециркулирующей пентановой фракции снижается на 8,8 %, удельный теплоподвод снижается на 3,2%, получен патент на изобретение № 2621349.

2. Разработан новый подход для определения диаметра колонны, оснащённой перекрестноточной насадкой.

3. С использованием средств вычислительной гидродинамики в среде Ansys Fluent проведена расчётная оценка различных типов конструкций перекрестноточных насадок с целью оптимизации их гидравлического сопротивления.

4. Разработаны три программы, предназначенные для подбора и проверочного расчёта теплообменного оборудования, насосов и контактных устройств колонн. Данные программы могут быть применены при проектировании установок нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятий (получены акты внедрения).

Вклад соискателя

Все представленные в диссертации результаты расчетов и экспериментов получены при участии автора. Соискатель принимал непосредственное участие в постановке задач, планировании экспериментов и проведении расчетов. Обработка полученных результатов расчетов, их анализ и подготовка к публикации в статьях и конференциях проводились совместно с соавторами, при этом вклад диссертанта был определяющим. Разработка технологии разделения продуктов изомеризации пентан-гексановой фракции проводилась совместно с соавторами патента.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих научных конференциях: XIII Международная научно-практическая конференция INTECH-ENERGY «Новые процессы, технологии и материалы в нефтяной отрасли XXI века», Москва, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012 г.; «Нефтегазпереработка – 2013, 2013, 2014, 2015, 2016»: Международная научно-практическая конференция; г. Уфа, ГУП ИНХП РБ.

Публикации

По материалам диссертации опубликована 22 работы, в том числе: 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, включая 1 статью в научном журнале входящем в международную базу Scopus, 1 патент на изобретение и 15 материалов научно-технических конференций; а также 3 свидетельства на официальную регистрацию программ для ЭВМ.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, библиографического списка из 174 наименований. Работа изложена на 140 страницах текста, содержит 25 таблиц и 46 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

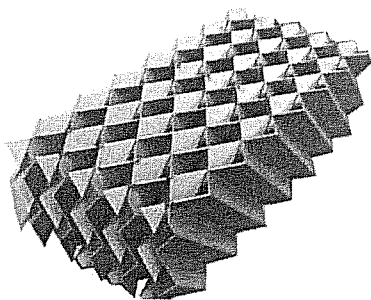
Во введении обоснована актуальность работы, обозначены ее научная и практическая значимость, сформулированы основные цели и задачи исследований.

В первой главе приведен анализ научной литературы из российских и иностранных источников по теме исследования и рассмотрены направления развития технологий фракционирования многокомпонентных смесей. Представлена классификация контактных устройств и проанализированы основы расчётов работы контактных устройств с использованием средств вычислительной гидродинамики.

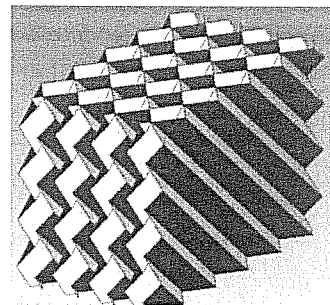
Во второй главе рассмотрены методы исследования. Методом исследования при разработке технологических схем процессов фракционирования углеводородов

является использование моделирующих систем (UniSim Design). Методом исследования при анализе работы и оптимизации аппаратного оформления являлось CFD моделирование (вычислительная гидродинамика). Это подраздел механики сплошных сред, включающий совокупность физических, математических и численных методов, предназначенных для вычисления характеристик процессов, при этом система уравнений Навье-Стокса решается с помощью численных методов.

Для оценки точности и адекватности выполняемых расчётов в системе Ansys Fluent предварительно выполнено исследование гидравлического сопротивления на примере расчёта потерь давления сухой противоточной насадки типа FLEXIPAC 3.5Y и выполнен сравнительный анализ с экспериментальными данными из официального сайта поставщика. На рисунке 1 представлен элемент насадки и трехмерная модель насадки, разработанная в Ansys Fluent.



а) насадка типа FLEXIPAC 3.5Y



б) модель насадки в Design Modeler

Рисунок 1 – Модель насадки FLEXIPAC 3.5Y

Результаты расчёта потерь давления в насадке в зависимости от фактора паровой нагрузки (F-фактора) и экспериментальные данные представлены на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, экспериментальные и расчётные данные практически совпадают. Это позволяет говорить о точности выполненных расчётов и возможности использования AnsysFluent для исследования работы контактных устройств.

Для выполнения работ по исследованию энергосберегающих технологий фракционирования были разработаны программы: «Расчёт стандартизированных аппаратов воздушного охлаждения», «Проектный и проверочный расчёт центробежных насосов» и «Проверочный расчёт диапазона устойчивой работы трапецеидно-клапанных тарелок». Разработанные программы успешно применяются в проектных работах при выполнении расчёта оборудования.

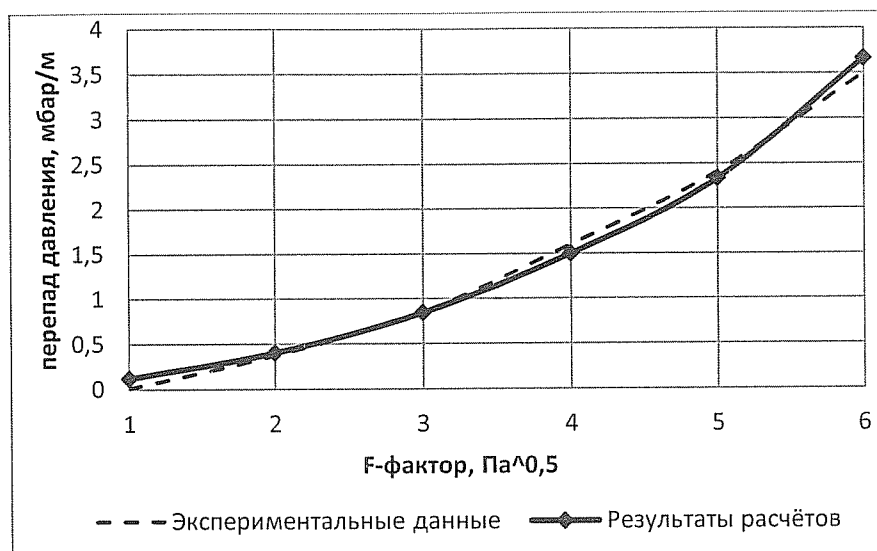
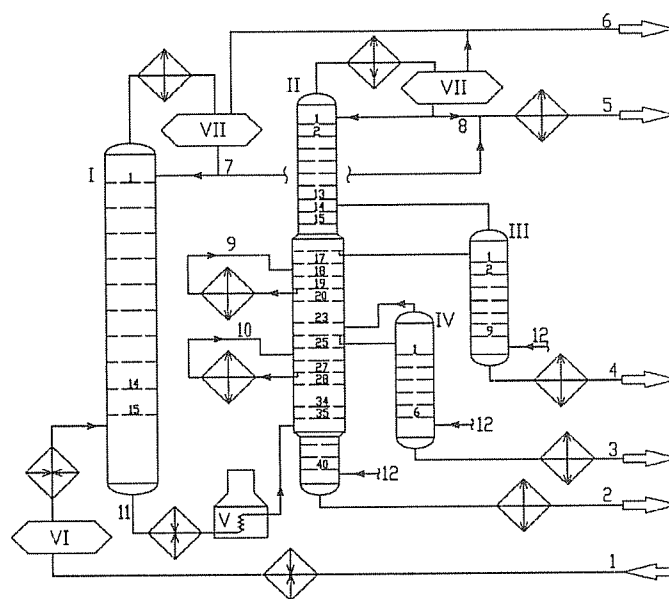


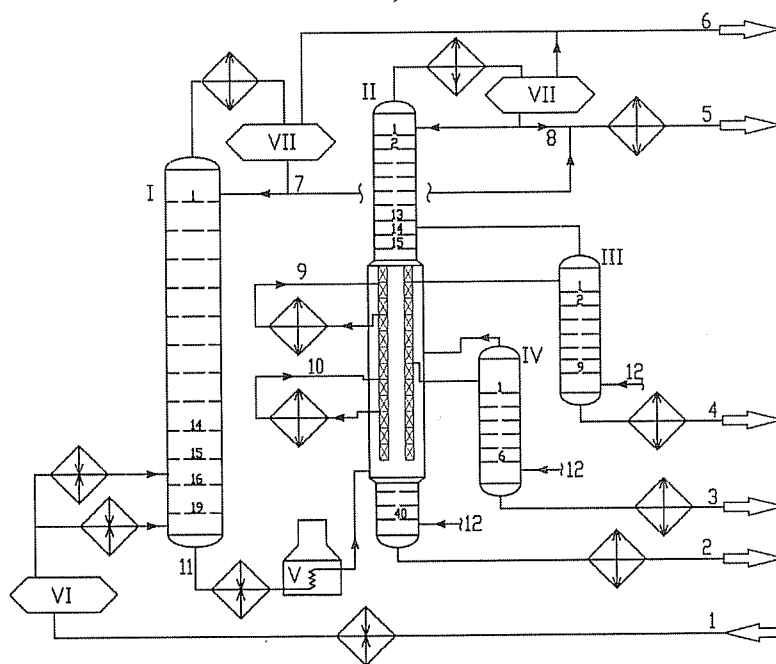
Рисунок 2 – Зависимость потерь давления в сухой неорошаемой насадке от паровой нагрузки (F-фактора)

Третья глава посвящена разработке ресурсо-энергосберегающих технологий фракционирования многокомпонентных смесей на примере установки атмосферной перегонки нефти АТ-800. Суть ресурсо-энергосберегающих технологий заключается в определении рациональной технологической схемы, подборе эффективных контактных устройств, выборе оптимальных параметров ректификации и соответствующем изменении схемы теплообмена установки в целом. Рассматриваемая в данном разделе установка атмосферной перегонки нефти перерабатывает 800 тыс. тонн в год сырой малосернистой нефти с получением следующего ассортимента продукции: нестабильный бензин, легкий и тяжёлый атмосферный газойли, мазут и углеводородный газ. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 3а.

Задача разработки энергосберегающей технологии первичной переработки нефти решалась параллельно с задачей интенсификации работы установки в связи с увеличением мощности установки первичной переработки нефти на 12,5 % по сравнению с фактической производительностью (с 800 до 900 тыс. тонн нефти в год). На первом этапе было проведено моделирование фактического режима работы установки первичной переработки нефти, при этом были выявлены следующие ее основные недостатки: удельные парожидкостные нагрузки основной части трапецевидно-клапанных тарелок в укрепляющих секциях ректификационных колонн К-1 и К-2 находятся на границе или вне пределов области их устойчивой работы; значительная доля высокопотенциального тепла потоков мазута и атмосферного газойля не используется для подогрева потоков нефти и теряется при их охлаждении в АВО; теплоотвод первым циркуляционным орошением колонны К-2 осуществляется только в одном теплообменном аппарате, поэтому его выход из строя приводит к необходимости остановки всей установки.



а)



б)

I – отбензинивающая колонна К-1; II – ректификационная колонна К-2; III – стриппинг-секция вывода лёгкого атмосферного газойля; IV – стриппинг-секция вывода тяжёлого атмосферного газойля; V – трубчатая печь; VI – электродегидратор; VII – флегмовая емкость.

1 – нефть сырая; 2 – мазут; 3 – тяжёлый атмосферный газойль; 4 – лёгкий атмосферный газойль; 5 – бензиновая фракция; 6 – углеводородный газ; 7 – бензин колонны К-1; 8 – бензин колонны К-2; 9 – промежуточное циркуляционное орошение ПЦО-1; 10 – промежуточное циркуляционное орошение ПЦО-2; 11 – отбензиненная нефть; 12 – водяной пар.

Рисунок 3 – Принципиальная схема установки АТ до (а) и после (б) модернизации

На втором этапе, для увеличения переработки нефти на установке до 900 тыс. тонн нефти в год, повышения отбора светлых нефтепродуктов от потенциала были предложены следующие технические решения: организация двухуровневого ввода нагретых в теплообменниках потоков нефти в ректификационную колонну К-1; оснащение колонны К-1 дополнительными трапецевидно-клапанными тарелками в отгонной секции; замена в укрепляющей секции ректификационной колонны К-2 трапецевидно-клапанных тарелок (20 штук) на модули регулярной перекрестно-точной насадки; организация нового потока для нагрева обессоленной нефти. Принципиальная схема работы установки с реализацией предложений по ее модернизации представлена на рисунке 3б.

Материальный баланс переработки 800 и 900 тыс. тонн в год сырой нефти на модернизируемой установке приведён в таблице 1.

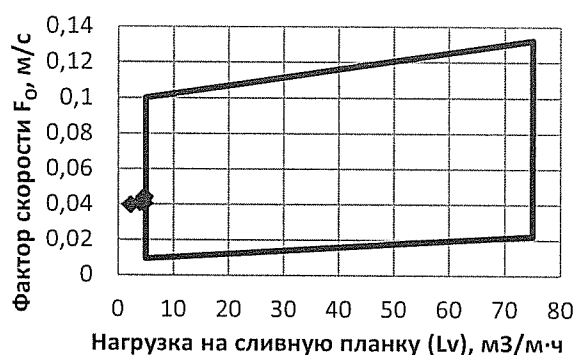
Таблица 1 – Материальный баланс переработки нефти на установке АТ-800

Наименование	800 тыс. тонн в год		900 тыс. тонн в год	
	Выход, % масс	Расход, кг/ч	Выход, % масс	Расход, кг/ч
Взято				
Нефть сырая	100,00	100000,00	100	112500,0
ИТОГО	100,00	100000,00	100	112500,0
Получено				
Газ	0,48	480,40	0,49	555,9
Бензиновая фракция	20,83	20831,48	18,90	21259,2
Легкий атм. газойль (керосиновая фр.)	16,79	16788,08	4,95	5573,1
Тяжёлый атм. газойль (атм. газойль)	17,86	17857,90	32,45	36501,3
Мазут	44,04	44042,14	43,21	48610,5
ИТОГО	100,00	100000,00	100,00	112500,0

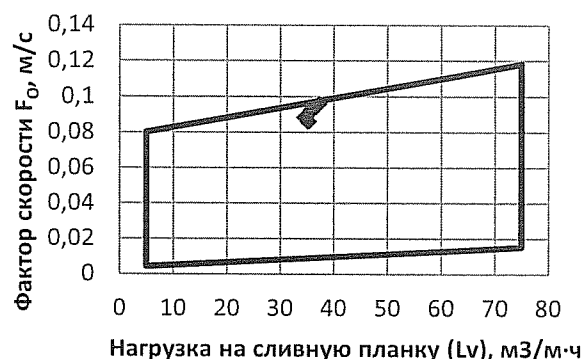
Как видно из таблицы 1 при переработке 800 тыс. тонн в год нефти, отбор светлых составляет 55,48 %, что составляет около 96,0 % от потенциала светлых в сырой нефти. При переработке 900 тыс. тонн в год суммарный отбор светлых нефтепродуктов увеличивается до 56,3 % масс. на нефть, это соответствует отбору на уровне 97,4 % от потенциального содержания в нефти суммы фракций, выкипающих при температуре до 360 °С, по сравнению с фактическим вариантом работы удельный теплоподвод на тонну сырья снизился более чем на 4,5%.

На рисунке 4 в графической форме изображена область устойчивой работы трапецевидно-клапанных тарелок колонн К-1 и К-2, на которую нанесены расчетные значения рабочих нагрузок тарелок при фактической производительности. Рас-

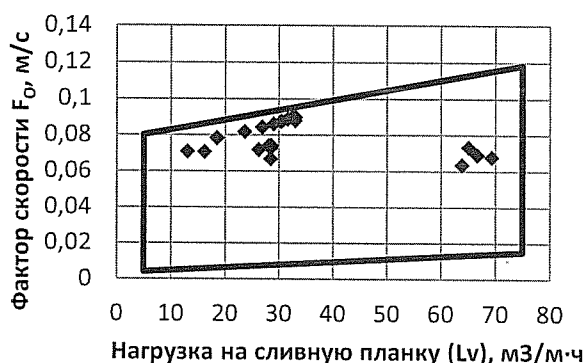
чѣты показали, что фракционирующая способность колонны К-1 невысокая, поскольку все трапецевидно-клапанные тарелки имеют очень низкую нагрузку по жидкости на периметр слива при средней загрузке по пару (рисунок 4а). В колонне К-2 на тарелки 1–15 воздействуют большие паровые нагрузки, на указанных тарелках наблюдается унос жидкости, вследствие чего трапецевидно-клапанные тарелки работают неэффективно (рисунок 4б). Тарелки 16–35 колонны К-2 сильно нагружены по паровым нагрузкам, кроме того, в зоне ввода циркуляционных орошений трапецевидно-клапанные тарелки испытывают большие жидкостные нагрузки (рисунок 4в). Тарелки 36–40 колонны К-2 работают в границах диапазона устойчивой работы при средних нагрузках по пару и по жидкости (рисунок 4г).



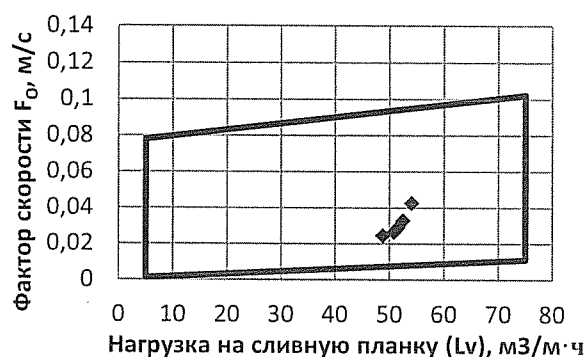
а) диапазон устойчивой работы и рабочие нагрузки тарелок колонны К-1



б) диапазон устойчивой работы и рабочие нагрузки тарелок 1÷15 колонны К-2



в) диапазон устойчивой работы и рабочие нагрузки тарелок 16÷35 колонны К-2



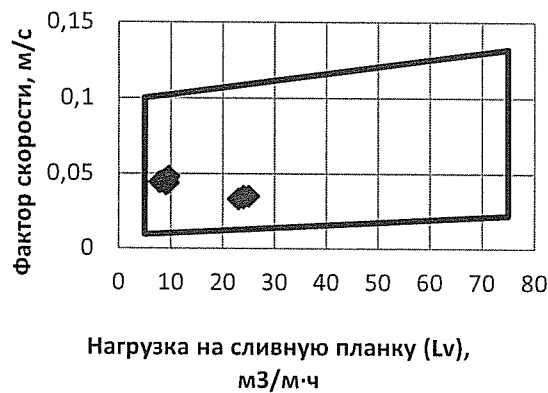
г) диапазон устойчивой работы и рабочие нагрузки тарелок 36÷40 колонны К-2

Рисунок 4 – Диапазон устойчивой работы трапецевидно-клапанных тарелок и рабочие нагрузки тарелок в колоннах К-1 и К-2 (при производительности установки по сырой нефти 800 тыс. тонн в год)

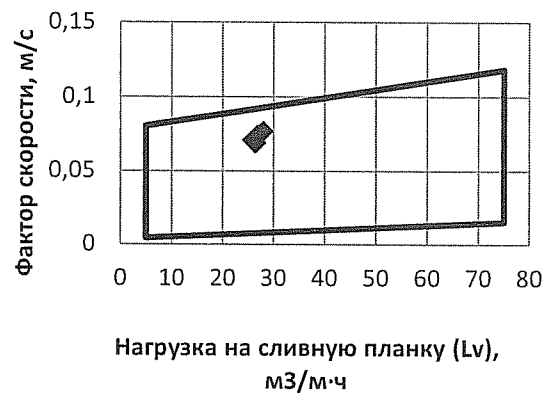
В целом, на основе анализа рисунка 4 видно, что при фактической работе установки АТ-800 область рабочих нагрузок тарелок колонн К-1 и К-2 находится

на границе устойчивой работы или вне границ диапазона устойчивой работы, увеличение производительности установки без изменения технологии фракционирования и внутренних контактных устройств в некоторых секциях не представляется возможным.

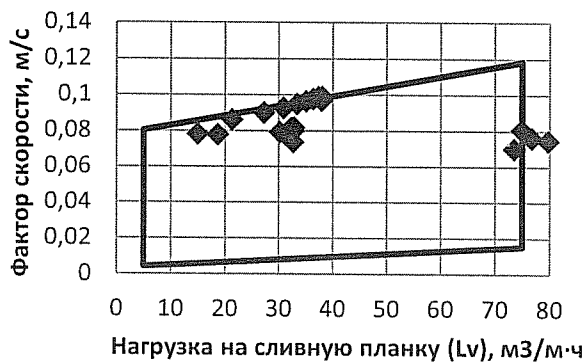
На рисунке 5 представлены области устойчивой работы трапецевидно-клапанных тарелок колонн К-1 и К-2 при производительности 900 тыс. тонн в год. Из рисунков 5а, 5б и 5г видно, что трапецевидно-клапанные тарелки колонн К-1 и К-2 работают в пределах области эффективной и устойчивой работы. Значение фактора паровой нагрузки этих тарелок находится в диапазоне от 1,38 до 1,63 $\text{Па}^{0,5}$, что составляет примерно 60-75 % от максимально допустимого значения, это обеспечит КПД данных тарелок на уровне 50 %. Этого достаточно для обеспечения требуемой фракционирующей способности колонн К-1 и К-2. Поэтому замена указанных контактных устройств не требуется.



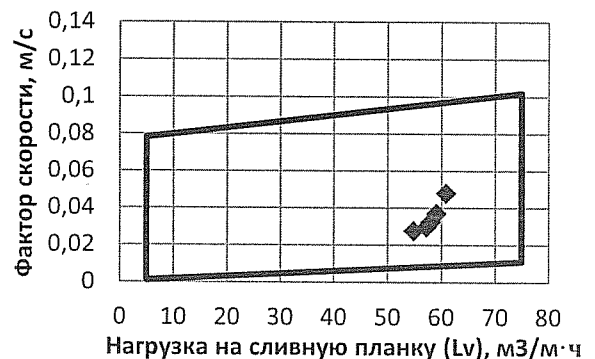
а) диапазон устойчивой работы и рабочие нагрузки тарелок колонны К-1



б) диапазон устойчивой работы и рабочие нагрузки тарелок 1–15 колонны К-2



в) диапазон устойчивой работы и рабочие нагрузки тарелок 16–35 колонны К-2



г) диапазон устойчивой работы и рабочие нагрузки тарелок 36–40 колонны К-2

Рисунок 5 – Диапазон устойчивой работы трапецевидно-клапанных тарелок и рабочие нагрузки тарелок в колоннах К-1 и К-2 (при производительности установки по сырой нефти 900 тыс. тонн в год)

В то же время из рисунка 5в видно, что при повышении производительности в секции укрепления керосиновой и газойлевой фракций колонны К-2 область рабочих нагрузок тарелок выходит за границы диапазона устойчивой работы: фактор паровой нагрузки превышает $2,5 \text{ Па}^{0,5}$, а жидкостные нагрузки в зоне ПЦО-1 и ПЦО-2 выходят за пределы максимально допустимых нагрузок на периметр слива для однопоточных тарелок, поэтому требуется их замена.

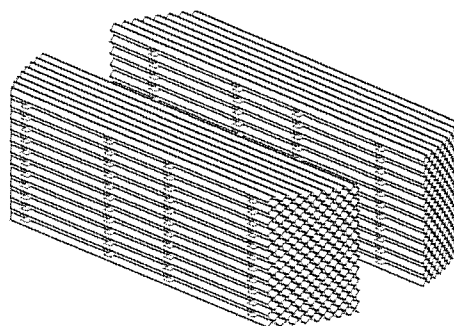
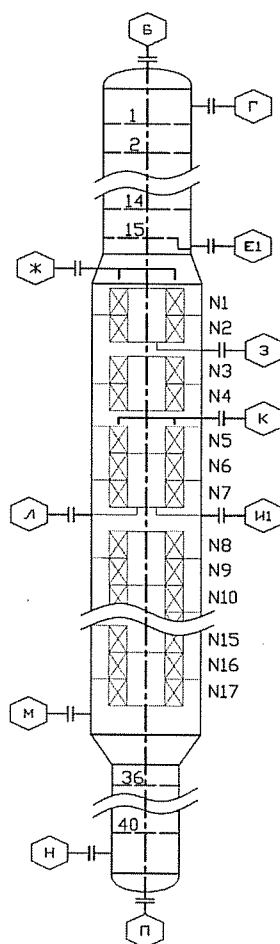


Рисунок 6 – Перекрёстноточная насадка в зоне ПЦО-2 колонны К-2



*М – ввод сырья; Б – вывод паров; Г – ввод орошения; Е1 – вывод лёгкого атмосферного газойля;
Ж – ввод ПЦО-1; З – вывод ПЦО-1; И1 – вывод тяжёлого атмосферного газойля; К – ввод ПЦО-2;
Л – вывод ПЦО-2; Н – ввод водяного пара; П – вывод мазута*

Рисунок 7 – Эскиз колонны К-2 установки АТ-800

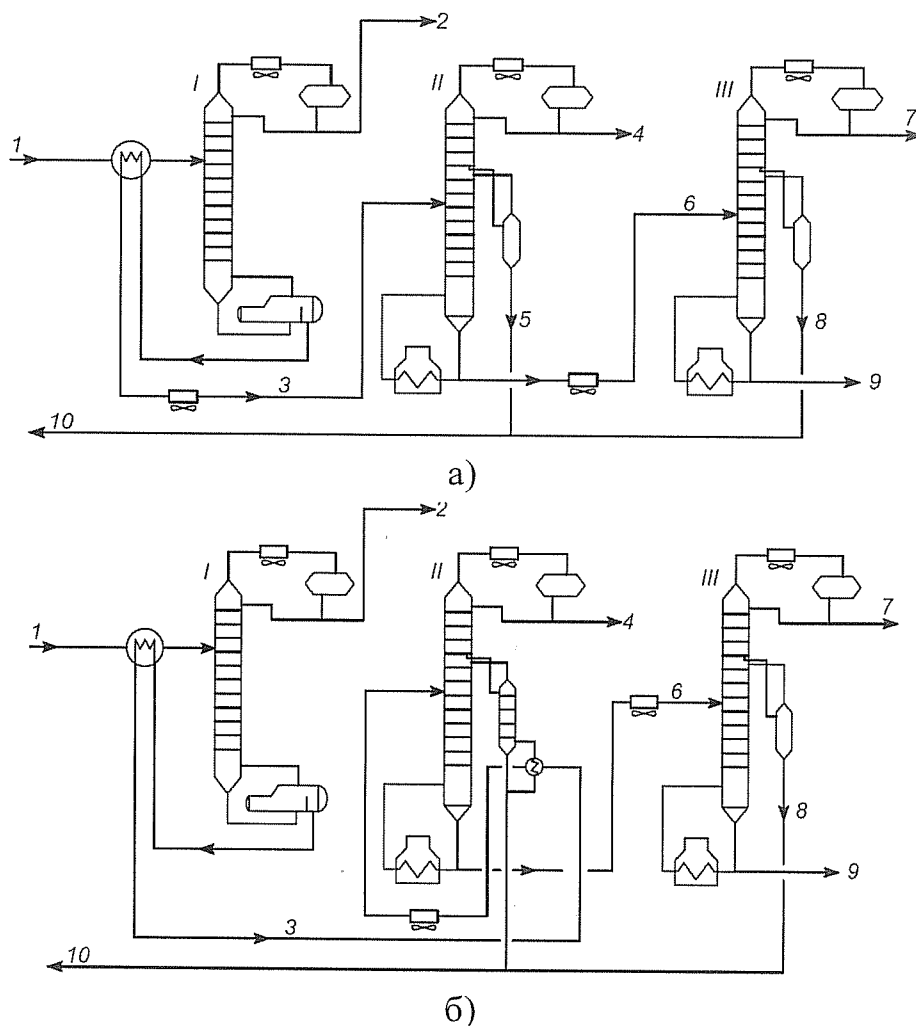
В связи с этим для секции укрепления керосиновой и газойлевой фракций колонны К-2 подготовлены технические решения по замене тарелок (№ 15–35) на семнадцать модулей регулярной перекрестноточной насадки типа «две полосы». Каждый модуль перекрестноточной насадки состоит из двух пакетов насадки, которые расположены параллельно в поперечном сечении колонны К-2. Над этими пакетами установлены распределители жидкости, конструктивно объединенные с перекрытиями для организации перекрестноточного движения потоков газа. Эскизы уровней и пакетов перекрестноточной насадки приведены на рисунке 6. Конструктивные размеры этих насадочных модулей выбраны таким образом, чтобы обеспечить эффективный массообмен при расчетных нагрузках контактирующих потоков пара и жидкости. Эскиз колонны К-2, оснащённой перекрёстноточными насадками, представлен на рисунке 7.

В четвертой главе рассмотрена энергосберегающая технология фракционирования углеводородов для вторичных процессов нефтепереработки на основе совершенствования конструктивного оформления, оптимизации системы теплообмена и снижения доли рецикловых потоков. С точки зрения теории ректификации рецикловые потоки являются нежелательными, так как они увеличивают энергозатраты на разделение. Предметом исследования в данной работе была выбрана секция разделения установки изомеризации Л-35/1 газокаталитического производства ОАО «Уфанефтехим». Принципиальная схема разделения продуктов изомеризации на установке до модернизации представлена на рисунке 8. Система разделения состоит из трёх колонн: стабилизации продуктов реакции, деизопентанизации и деизогексанизации. Согласно действующей схеме из колонн деизопентанизации и деизогексанизации предусмотрены выводы фракций н-пентана и н-гексана в качестве боковых погонов (рисунок 8а).

Углеводороды разветвлённого строения, содержащиеся в рецикловой фракции нормальные углеводороды, не только снижают пропускную способность реактора изомеризации, но также смещают равновесие в сторону исходных компонентов реакции изомеризации по принципу Ле-Шателье, что приводит к снижению выхода целевых продуктов за один проход в реакторе и к понижению производительности установки. Поэтому с точки зрения принципа Ле-Шателье для оптимизации условий работы реактора изомеризации необходимо обеспечить минимальное содержание изокомпонентов в сырье реактора. В связи с этим разработана новая технологическая схема разделения продуктов изомеризации, позволяющая снизить содержание целевых изомерных углеводородов в рецикловом потоке (рисунок 8б).

На первом этапе с использованием UniSim Design было произведено исследование фактической работы колонн деизопентанизации и деизогексанизации, тех-

нико-эксплуатационные показатели которых определяют количество и качество рецикловых потоков. По результатам моделирования фактической работы установлено, что боковой рецикловый погон колонны деизопентанизации при такой схеме работы содержит около 26 % изопентана. Такое содержание изопентана в рецикло-вой фракции снижает отбор целевого продукта – изопентановой фракции, выводимой в качестве дистиллята, увеличивает количество рециркулирующей пентановой фракции и соответственно увеличивает энергозатраты и нагрузку на реакторный блок и отгонную секцию колонны стабилизации. В целом система выделения изопентана работает неэффективно и требуется её реконструкция.



I – колонна стабилизации; II – колонна деизопентанизации; III – колонна деизогексанизации. 1 – продукты реакций изомеризации; 2 – рефлюкс; 3 – стабильный изомеризат; 4 – фракция изопентана; 5 – фракция н-пентана; 6 – депентанизованный изомеризат; 7 – фракция изогексана; 8 – фракция н-гексана; 9 – кубовый продукт колонны деизогексанизации; 10 – рецикл (фракции н-пентана и н-гексана)

Рисунок 8 – Существующая (а) и предлагаемая (б) схемы разделения продуктов

При разделении углеводородов в колонне деизогексанизации по сравнению с колонной деизопентанизации имеются два принципиальных отличия: рецикловый

поток из деизогексанизатора содержит в себе не только н-гексан, но и его изомеры с одним метильным радикалом, так как их октановое число низкое и требуется дополнительная изомеризация; разница между температурами кипения линейного углеводорода и его изомеров для гексана по сравнению с пентаном выше, в связи с чем требуется меньшее количество контактных ступеней для разделения углеводородов и их соответствующих изомеров. Как показали расчёты, колонна деизогексанизации работает достаточно эффективно, обеспечивая необходимую степень разделения между н-гексаном и его высокооктановыми изомерами. В этой связи, изменение системы выделения н-гексана в данном случае не требуется.

Таблица 2 – Компонентный состав рецикловых фракций н-пентана и н-гексана при фактической работе

Компонент	Состав, % масс.	
	Фракция н-пентана	Фракция н-гексана
Изо-бутан	0,009	0,000
Н-бутан	0,030	0,000
2,2-диметилпропан	0,015	0,000
Изо-пентан	26,466	0,000
Н-пентан	72,522	0,000
2,2-диметбутан	0,816	0,395
2,3-диметбутан	0,049	6,992
2- метилпентан	0,083	46,504
3- метилпентан	0,006	18,046
Н-гексан	0,001	16,706
Метилциклопентан	0,001	9,933
С6+	0,000	1,422
Итого	100,000	100,000

На втором этапе с использованием программы UniSim Design была разработана энергосберегающая технология установки изомеризации пентан-гексановой фракции, суть которой заключается в уменьшении расходов рецикловых потоков за счет организации дополнительной стриппинг-секции для вывода из колонны деизопентанизации рециркулирующей фракции н-пентана. Стриппинг-секция позволит отпарить легкокипящие и нежелательные для реакторного блока изопентановые компоненты из рециклового потока и оптимизировать его состав. Данное техническое решение позволит повысить качество выделения непрореагировавшего н-пентана, увеличить отбор изопентановой фракции на 11,6 % по сравнению с отбором дистиллята по существующей схеме, снизить количество рецикловых потоков на 8,8 %, увеличить отбор изопентановой фракции до 83,5 % от потенциала при

содержании целевой фракции на уровне 95 % масс. и увеличить содержание н-пентана в рециркулирующей фракции с 72,52 до 81,82 % масс. В качестве теплоносителя в стриппинг-секцию колонны деизопентанизации (II) рекомендуется использовать внутренний технологический поток (продукт колонны стабилизации (I)), что позволит увеличить степень рекуперации тепла на установке и не использовать дополнительные энергоносители. Материальный баланс колонны деизопентанизации по фактическому и предлагаемому вариантам представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Материальный баланс колонны деизопентанизации

	Фактический вариант		Предлагаемый вариант		Относительная разница
	кг/ч	%масс.	кг/ч	%масс.	
Взято					
Продукты колонны стабилизации	90331	100,00	90331	100,00	-
ИТОГО	90331	100,00	90331	100,00	-
Получено					
Изопентан	13714	15,18	15300	16,94	увеличение на 11,6 %
Н-пентан в рецикл	17999	19,93	16413	18,17	снижение на 8,8 %
Кубовый продукт колонны деизопентанизации	58618	64,89	58618	64,89	-
ИТОГО	90331	100,00	90331	100,00	-

Таким образом, проведённые расчетные исследования системы разделения установки изомеризации показали, что для снижения количества рецикловых потоков и повышения содержания в них целевых компонентов, колонну деизопентанизации необходимо дооборудовать стриппинг-секцией. Это решение позволит повысить качество выделения непрореагировавшего н-пентана, отправляемого на рецикл, снизить количество рецикловых потоков на 8,8 %, также уменьшить содержание изо-пентана во фракции н-пентана с 26 % до 17,8 % масс. При этом по сравнению с фактическим вариантом работы удельный теплоподвод на тонну продукта за один проход реактора снизился на 3,2%.

На предлагаемый вариант разделения продуктов изомеризации получен патент на изобретение № 2621349 «Способ разделения изопентан-пентан-изогексан-гексановой фракции, снижающий долю рецикловых потоков в системе» от 02.06.2017.

Пятая глава посвящена исследованию работы перекрестноточной насадки с использованием средств вычислительной гидродинамики (CFD моделирование) в системе Ansys Fluent и анализу гидродинамики перекрестноточных насадок с целью снижения гидравлического сопротивления. При технологических расчетах

массообменного колонного аппарата важным этапом является расчет его основных размеров: диаметра колонны, который определяет производительность аппарата, и рабочей высоты насадки, которая отражает эффективность протекающего процесса. Это особенно важно при расчёте проектируемой колонны с перекрестноточной насадкой. Перекрестноточные насадки за счёт независимого сечения для прохода пара и жидкости позволяют не только в широких пределах изменять геометрические размеры насадочных модулей, но и оптимизировать высоту и диаметр аппарата. В каждом контактном элементе насадки жидкость движется вертикально, а пар движется горизонтально. За пределами контактного устройства пар движется вертикально. При этом пар и жидкость движутся в разных пространствах: $S_{ж}$ и $S_{п}$ (рисунок 9).



Рисунок 9 – Схематическое отображение сечений для движения пара и жидкости в колонне с перекрестноточной насадкой

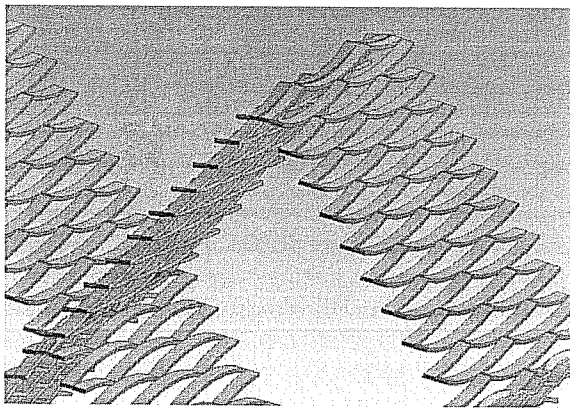
Для обеспечения перекрёстного тока (горизонтального движения пара) требуется перекрытие части площади сечения по пару (рисунок 9). Таким образом, требуемое сечение для прохода пара ($S_{п}$) оказывается несколько больше реальной площади свободного сечения для прохода пара ($S_{св}$), данная разница зависит от конструкции насадки (например для насадки типа «одна полоса» коэффициент ($S_{св}/S_{п}$) составляет $n=2$). На основании этого рассчитывается диаметр (D) колонны с перекрёстноточной насадкой:

$$D = \sqrt{\frac{n \cdot V_{п} \sqrt{\rho} + \frac{V_{ж}}{\Pi}}{\frac{3600 \cdot F_0}{0,785}}}, \quad (1)$$

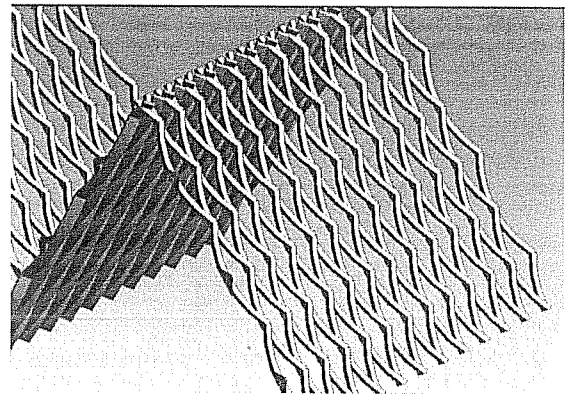
где $V_{п}$ – объёмный расход паров, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 ρ – плотность паров, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 $V_{ж}$ – объёмный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 F_0 – фактор скорости в свободном сечении, $\text{Па}^{0,5}$;
 Π – плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Кроме этого были выполнены исследования по совершенствованию конструктивного оформления с точки зрения гидравлического сопротивления перекрёстноточной насадки с использованием средств вычислительной гидродинамики. Как известно, в перекрёстноточных насадках пластины состоят из просечно-вытяжного листа с горизонтальными гофрами. Комбинации гофрированных листов образуют блок перекрёстноточной насадки.

В настоящее время существует большое количество вариантов конфигурации элементов блока перекрёстноточной насадки. Для выполнения расчётов были выбраны два типа насадки: с зеркальным расположением горизонтально гофрированных просечно-вытяжных листов, направление просечки параллельно направлению гофрирования – тип I (рисунок 10а); с зеркальным расположением горизонтально гофрированных просечно-вытяжных листов, направление просечки перпендикулярно направлению гофрирования – тип II (рисунок 10б).



а) параллельно



б) перпендикулярно

Рисунок 10 – Варианты выполнения просечки относительно гофрированного листа

Удельные поверхности насадок типов I и II составляют $80\text{--}82\text{ м}^2/\text{м}^3$. Из пространенных типов насадок близкой по удельной поверхности можно считать насадки типа FLEXIPAC 3.5Y (Koch-Glitsch) или MELLAPACK 3.5Y (Zulser) с удельной поверхностью $80\text{ м}^2/\text{м}^3$. В программе Ansys Fluent были проведены расчёты перепада давления на сухой насадке в зависимости от фактора нагрузки по пару (F-фактора). Для расчётов были выбраны различные варианты рабочей среды – паровой фазы, проходящей через насадку (воздух, пары дизельной фракции и пары бензиновой фракции). Основные результаты расчётов в графическом виде представлены на рисунках 11 и 12.

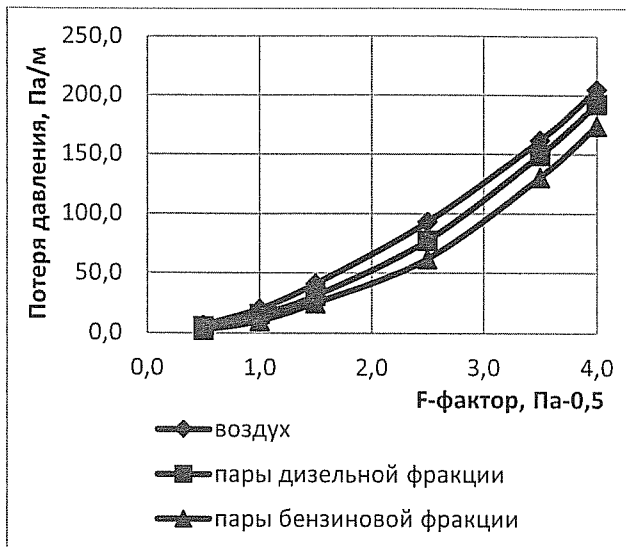


Рисунок 11 – Зависимость потерь давления от F-фактора на насадке типа I

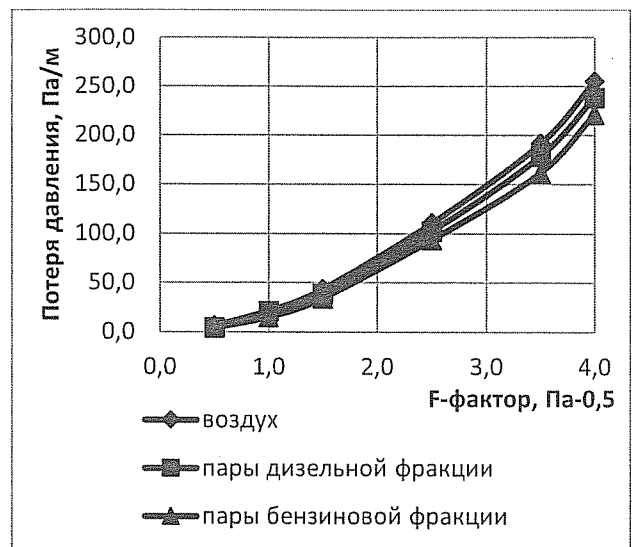


Рисунок 12 – Зависимость потерь давления от F-фактора на насадке типа II

На рисунке 13 представлен сравнительный анализ удельного перепада давления на неорошаемых насадках типа I, типа II и противоточной насадки FLEXIPAC 3.5Y для модельного потока воздуха. Из рисунка 13 видно, что удельное гидравлическое сопротивление противоточной насадке ниже, чем перекрёстноточной насадки. Однако на практике, в массообменном аппарате с противоточной насадкой перепад давления оказывается выше. Это объясняется тем, что в колонне с перекрёстноточной насадкой, паровая фаза в элементе насадки движется в горизонтальном направлении и общая длина пути пара в перекрёстноточной насадке оказывается значительно ниже, чем в противоточной.

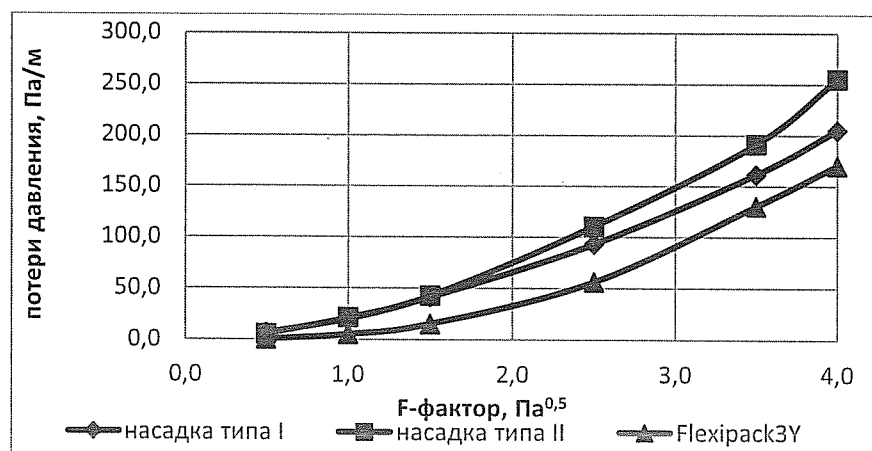


Рисунок 13 – Зависимость перепада давления от F-фактора на насадках типа I, типа II и Flexipac 3.5Y

На втором этапе исследования были определены коэффициенты гидравлического сопротивления для расчёта потерь давления по классическому уравнению Дарси-Вейсбаха. Коэффициент гидравлического сопротивления (λ) в общем виде

был выражен через уравнение:

$$\lambda = A/Re^{\alpha} \quad (2)$$

где A, α – коэффициенты;

Re – критерий Рейнольдса.

Коэффициенты A и α уравнения (2) определены методом наименьших квадратов и уравнения для расчёта коэффициента гидравлического сопротивления имеют вид:

– для типа I $\lambda = 247,4 Re^{-0,32} \quad (3)$

– для типа II $\lambda = 95,34 Re^{-0,19} \quad (4)$

При этом уравнение Дарси-Вейсбаха расчёта перепада давления примет вид:

– для типа I $\Delta P = 247,4 Re^{-0,32} \cdot \frac{H}{d_{\text{экв}}} \cdot \frac{\rho w^2}{2g} \quad (5)$

– для типа II $\Delta P = 95,34 Re^{-0,19} \cdot \frac{H}{d_{\text{экв}}} \cdot \frac{\rho w^2}{2g} \quad (6)$

где λ – коэффициент сопротивления сухих насадок;

ρ – плотность газа, кг/м³;

w – истинная скорость газа в свободном сечении, м/с;

H – высота насадки, м;

$d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр насадки.

На рисунке 14 представлена зависимость гидравлического сопротивления от коэффициента Рейнольдса на насадках типа I, типа II в графическом виде.

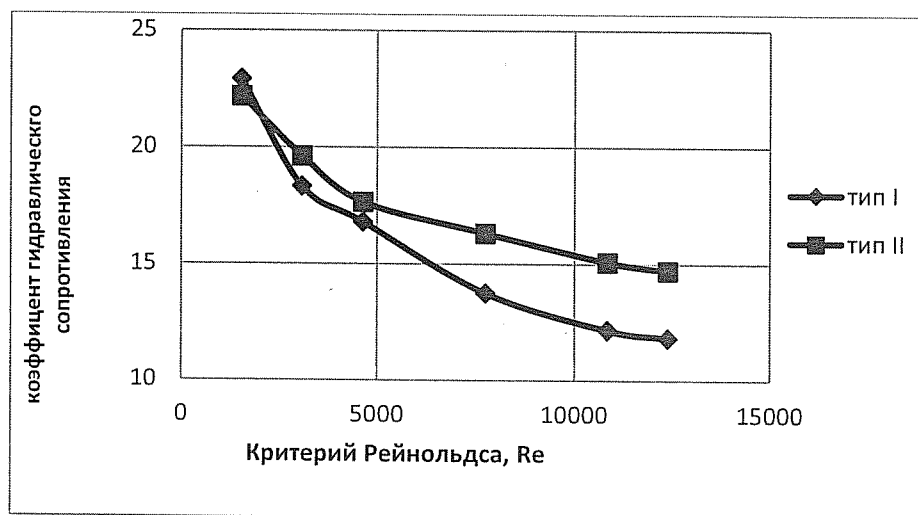


Рисунок 14 – Зависимость гидравлического сопротивления от критерия Рейнольдса на насадках типа I, типа II

Таким образом, расчётами определено, что меньшим сопротивлением обладает насадка типа I с направлением просечки параллельно гофрированию, формулы расчёта

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Для установки первичной переработки нефти разработана энергосберегающая технология, базирующаяся на совершенствовании схемы фракционирования и системы теплообмена, оптимизации выбора контактных устройств. Обеспечено увеличение производительности на 12,5 % (с 800 до 900 тыс. тонн в год), увеличение выхода светлых нефтепродуктов с 96,0 до 97,4 % от их потенциала в нефти и получение мазута с низким (5% об.) содержанием фракций, выкипающих до температуры 360 °С, при снижении удельного теплоподвода на 4,5%. Получена справка о внедрении.

2. Разработана энергосберегающая технология фракционирования легких углеводородов на основе совершенствования схемных решений, оптимизации системы теплообмена и снижения рецикловых потоков для установки вторичных процессов (на примере установки изомеризации Л-35/1). Разработанная технология позволяет, по сравнению с фактической работой установки, снизить количество рециклового потока на 8,8%, соответственно увеличить производительность реакторного блока при снижении удельного теплоподвода на 3,2%. Получен патент на изобретение № 2621349 «Способ разделения изопентан-пентан-изогексан-гексановой фракции, снижающий долю рецикловых компонентов в системе».

3. Для ректификационных колонн, оснащённых перекрёстноточными насадками, предложена новая методика расчёта диаметра колонны, учитывающая фактор паровой нагрузки в свободном сечении колонны.

4. Компьютерным моделированием в среде Ansys Fluent проведена расчётная оценка коэффициента гидравлического сопротивления различных типов конструкций перекрёстноточных насадок. Получены формулы по расчёту гидравлического сопротивления для двух конструкций перекрестноточных насадок и зависимости гидравлического сопротивления неорошаемого элемента перекрестноточной насадки от фактора паровой нагрузки.

5. Разработаны программы, предназначенные для подбора и проверочного расчёта теплообменного оборудования, насосов и диапазона устойчивой работы контактных устройств. Получены справки о применении данных программ при проектировании установок нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятий.

Основное содержание диссертации изложено в следующих научных трудах:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

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

перевод статьи:

Faizov, A.R. Determination of pressure overbalance of non-sprayed crosscurrent packed contact devices by means of ANSYS Fluent system/ A.R. Faizov, S.K. Churakova, G. M. Sidorov // Chemical and petroleum engineering – 2018 – Vol 54. – pp 130-135 (Scopus).

2. Фаизов, А.Р. Совершенствование технологии разделения продуктов изомеризации / А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова, К.Ф. Богатых, Э.М. Гильванова, Э.И. Галиева // Нефтегазовое дело. – 2014. – Т.12. – № 4. – С. 76-82.

перевод статьи:

Faizov, A.R. Improvement of isomerization product distillation technology / A.R. Faizov, S.K. Churakova, K.F. Bogatykh, E.M. Gilvanova, E.I. Galieva // Нефтегазовое дело. – 2014. – Т. 12. – № 4. – С. 83-89.

3. Фаизов, А.Р. Моделирование режима сброса с ректификационных колонн / А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова, В.С. Пручай // Башкирский химический журнал. – 2013. – Т.20. – №2. – С. 52-54.

В патентах

4. Патент №2621349 (РФ) МПК C07C 7/04. Способ разделения изопентан-пентан-изогексан-гексановой фракции, снижающий долю рецикловых компонентов в системе. / А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова, Э.М. Гильванова // - №2016112101/06. Заявл. 30.03.2016; опубл. 02.06.2017, бюл. №16.

В материалах международных научно-практических конференций

5. Фаизов, А.Р. Оптимизация режима фракционирования – важный фактор ресурсосбережения в процессах первичной переработки нефти / А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова // XIII Международная научно-практическая конференция INTECH-ENERGY «Новые процессы, технологии и материалы в нефтяной отрасли XXI века» : сборник материалов науч. конф. – М. : изд-во РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012.

6. Фаизов, А.Р. Математическое моделирование технологического процесса в среде Unisim Design и ASPEN PIMS / А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова, О.С. Шпак, Е.А. Кантор // Сборник докладов III Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология». – 2012. – С.248-252.

7. Фаизов, А.Р. Оптимизация режима работы атмосферного блока установки ЭЛОУ-АВТ-4 на основе математического моделирования / А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова, О.С. Шпак, Е.А. Кантор // Материалы Международной научно-практической конференции «Нефтегазопереработка-2012» – Уфа : Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2012. – С. 215-216.

8. Фаизов, А.Р. Анализ работы атмосферного блока установки ЭЛОУ-АВТ-4 ОАО «Газпром нефтехим Салават» / А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова, О.С. Шпак // Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, посвященной году химии. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2012. – Т. 1.

9. Фаизов, А.Р. Расчет выбросов с предохранительных клапанов с применением динамического режима расчетной системы UNISIM DESIGN / А.Р. Фаизов, В.С. Пручай // Материалы Международной научно-практической конференции «Нефтегазопереработка-2013». – Уфа : Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2013. – С. 245-246.

10. Чуракова, С.К. Совершенствование работы фракционирующего оборудования на установке изомеризации / С.К. Чуракова, А.Р. Фаизов, Л.А. Панчихина // Материалы Международной

научно-практической конференции «Нефтегазопереработка-2014». – Уфа : Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2014.

11. Чуракова, С.К. Предложения по снижению энергозатрат и повышению выхода целевого продукта в процессе изомеризации / А.И. Иксанова, А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова // Тезисы докладов XVI международной научно-технической конференции «Приоритетные направления развития науки и технологий». – Тула : Изд-во «Инновационные технологии», 2014.

12. Фаизов, А.Р. Новые возможности использования перекрёстноточных насадочных контактных устройств / А.Р. Фаизов // Материалы Международной научно-практической конференции «Нефтегазопереработка-2015». – Уфа : Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2015.

13. Иксанова, А.И. Предложения по совершенствованию работы колонны стабилизации изомеризата / А.И. Иксанова, А.Р. Фаизов, К.Ю. Денисов // Материалы Международной научно-практической конференции «Нефтегазопереработка-2015». – Уфа: Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2015.

14. Гильванова, Э.М. Влияние снижения количества рецикловых потоков на работу реакторного блока установки изомеризации / Э.М. Гильванова, А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова, Э.И. Галиева // Материалы Международной научно-практической конференции «Нефтегазопереработка-2015». – Уфа: Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2015.

15. Гильванова, Э.М. Сравнительный анализ различных методов представления углеводородно-фракционного состава нефтяного сырья в расчетной среде UNISIM DESIGN / Э.М. Гильванова, А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова // Актуальные проблемы науки и техники – 2015 Материалы VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых. – 2015. – С. 290-292.

16. Фаизов, А.Р. Сравнительный анализ энергозатрат на установках атмосферной перегонки нефти при различных вариантах технологической схемы / А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова // Материалы Международной научно-практической конференции «Нефтегазопереработка-2016». – Уфа: Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2016.

17. Чуракова, С.К. Анализ фактической работы и предложения по модернизации малотоннажной установки АТ / С.К. Чуракова, Р.Н. Резяпов, И.Д. Нестеров, А.Р. Фаизов // Материалы Международной научно-практической конференции «Нефтегазопереработка-2016». – Уфа: Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2016.

18. Фаизов, А.Р. Влияние выбора проектных схемных решений на удельные энергозатраты при атмосферной перегонке нефти / А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова // Теория и практика массообменных процессов химической технологии (Марушкинские чтения): сб. материалов науч. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016.

19. Фаизов, А.Р. Обобщённые предложения по увеличению производительности малотоннажных установок атмосферной перегонки нефти / А.Р. Фаизов, С.К. Чуракова // Теория и практика массообменных процессов химической технологии (Марушкинские чтения): сб. материалов науч. конф. – Уфа: изд-во УГНТУ, 2016.

Программы для ЭВМ

20. Свидетельство № 2016612009 «Расчёт стандартизированных аппаратов воздушного охлаждения»: программа для ЭВМ / А.Р. Фаизов, правообладатель А.Р. Фаизов, заявл 24.12.2015 № 2015663076; опубл. 16.02.2016, 154Кб.

21. Свидетельство № 2016662368 «Проверочный расчёт диапазона устойчивой работы трапециевидно-клапанных тарелок»: программа для ЭВМ / А.Р. Фаизов, правообладатель А.Р. Фаизов, заявл 12.09.2016 № 2016619759; опубл. 08.11.2016, 132 Кб;

22. Свидетельство № 2016662119 «Проектный и проверочный расчёт центробежных насосов»: программа для ЭВМ / А.Р. Фаизов, правообладатель А.Р. Фаизов, заявл 12.09.2016 № 2016619738; опубл. 31.10.2016, 30Кб.