

На правах рукописи



КРУГЛОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАТОРА ДИСКОВОГО ТИПА
ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА НЕФТЯНЫХ МАСЕЛ**

Специальность: 05.02.13 - «Машины, агрегаты и процессы»
(нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2016

Работа выполнена на кафедре «Оборудование нефтегазопереработки» ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Лукьянов Виктор Алексеевич

Официальные оппоненты: **Носов Геннадий Алексеевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский технологический университет», институт тонких химических технологий (МИТХТ), кафедра «Процессы и аппараты химической технологии им. Н.И. Гельперина», профессор

Нигматуллин Ришат Гаязович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», кафедра «Оборудование и технология сварочного производства», профессор

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

Защита диссертации состоится «7» июля 2016 года в 11-30 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1.

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

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Абуталипова Елена Мидхатовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В российской нефтепереработке наиболее распространены традиционные технологии депарафинизации масел и обезмасливания гачей и петролатумов в избирательных растворителях. Данные процессы являются наиболее трудоемкими и дорогостоящими в технологической цепочке производства нефтяных базовых масел, парафинов и церезинов. Они требуют высоких затрат энергии на охлаждение сырьевой смеси до отрицательных температур и регенерацию большого количества растворителя, идущего на разбавление сырья. Отрицательными чертами этих процессов также являются высокая металлоемкость, сложность и ненадежность применяемого оборудования (при фактическом отсутствии альтернативных конструкций), что приводит к большим затратам на его эксплуатацию, ремонт и обслуживание, а также к потерям сырья и растворителя в процессе. По разным данным на долю процесса депарафинизации в себестоимости производства масел приходится от 40 до 50%.

Практика показывает, что реконструкция или частичная замена эксплуатируемого оборудования на действующих маслблоках является быстрым и экономичным способом повышения производительности и экологической безопасности технологических процессов, а также снижения эксплуатационных затрат, уменьшения себестоимости и повышения качества продукции.

Таким образом, решение задач по совершенствованию оборудования процессов депарафинизации и обезмасливания, является актуальным направлением. Это в свою очередь предопределяет высокую значимость настоящей диссертационной работы, направленной на повышение эффективности аппаратуры для кристаллизации, являющейся основным оборудованием в составе установок депарафинизации и обезмасливания, так как от качества работы кристаллизаторов во многом зависят технико-экономические показатели всей технологической установки.

Область исследования соответствует паспорту специальности ВАК РФ 05.02.13 - «Машины, агрегаты и процессы» (нефтегазовая отрасль): п.5. Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин,

агрегатов и процессов и оценки их экономической эффективности и ресурса.

Целью работы является повышение эффективности дискового кристаллизатора регенеративного (ДКР) путем интенсификации теплообмена и реализации распределенного ввода растворителя.

Реализация цели диссертационной работы осуществляется путем постановки и решения следующих **основных задач**:

1 Разработать компьютерную гидро-теплодинамическую модель ДКР и проверить ее адекватность реальным режимам работы промышленного аппарата;

2 Определить скорость и направление движения потока сырья в междисковых камерах ДКР;

3 Определить зависимости коэффициентов теплоотдачи в ДКР от технологических параметров рабочего режима аппарата;

4 Определить способ интенсификации теплообмена в ДКР и разработать соответствующее конструктивное решение, определить метод оценки и провести оптимизацию предложенной конструкции в соответствии с этим методом;

5 Разработать конструктивное решение для реализации распределенного ввода растворителя в корпус ДКР, определить метод оценки и провести оптимизацию предложенной конструкции в соответствии с этим методом.

Научная новизна

1 Определены аналитические зависимости средних коэффициентов теплоотдачи потоков в междисковом и дисковом пространствах ДКР от технологических параметров рабочего режима аппарата, позволяющие вычислить их значения с точностью до 15%;

2 Получены графические зависимости частоты вращения потока сырья от радиуса междисковой камеры ДКР при различных частотах вращения приводного вала аппарата.

Методы исследования

Решение поставленных задач осуществляется теоретическими, расчетными и экспериментальными методами на основе известных из науки положений и подходов, при помощи самостоятельно разработанных автором методик и алго-

ритмов, применения специализированных программных комплексов для гидро- и теплодинамического компьютерного моделирования и технологических расчетов, систем автоматизированного проектирования, методов планирования эксперимента и обработки экспериментальных данных.

На защиту выносятся

1 Оптимизированная конструкция перемешивающего устройства, установка которого в междисковых камерах ДКР позволяет повысить энергоэффективность холодильного отделения за счет интенсификации теплообмена в аппарате;

2 Оптимизированная конструкция распределительного устройства для ввода растворителя в корпус ДКР, позволяющая реализовать технологическое решение по повышению скорости фильтрации суспензии за счет обеспечения наиболее полного выравнивания концентрации растворителя в аппарате;

3 Численная компьютерная гидро- теплодинамическая модель ДКР, адекватно воспроизводящая условия рабочего режима аппарата, и соответствующий алгоритм обработки данных моделирования;

4 Уравнения для вычисления средних коэффициентов теплоотдачи потоков в междисковом и дисковом пространствах ДКР в зависимости от технологических параметров рабочего режима аппарата;

5 Количественные зависимости частоты вращения сырьевого потока в междисковых камерах ДКР от частоты вращения приводного вала аппарата.

Практическая ценность

Результаты диссертационной работы (в т.ч. защищенные патентом РФ на полезную модель №139340) применены российской проектной организацией ЗАО «ПЕТРОХИМ ИНЖИНИРИНГ» (г. Москва) при разработке технического проекта №ПХИ-163М4-00.00.000 (в 2014 г.) модернизированной конструкции ДКР и внедрены в учебный процесс по дисциплинам «Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии», «Компьютерные технологии инженерного анализа при проектировании оборудования нефтегазопереработки и нефтехимии» и «Машины и аппараты нефтегазопереработки», преподаваемым на кафедре «Оборудование нефтегазопереработки» ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина».

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на IV Научно-практической конференции «Перспективные технологии подготовки, переработки нефти и газа» (15 ноября 2012 г., Респ. Башкортостан, г. Туймазы); IX Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (30 января - 1 февраля 2012 г., г. Москва); X Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (10-12 февраля 2014 г., г. Москва); 66 Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2012» (17-20 апреля 2012 г., г. Москва); 67 Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2013» (9-12 апреля 2013 г., г. Москва); 68 Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2014» (14-16 апреля 2014 г., г. Москва); 69 Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ - 2015» (14-16 апреля 2015 г., г. Москва); заседании научно-технической комиссии ЗАО «ПЕТРОХИМ ИНЖИНИРИНГ» (9 декабря 2013 г., г. Москва); научных семинарах кафедры «Оборудование нефтегазопереработки» ФГБОУ ВПО «РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина» (2012-2015 гг., г. Москва); аттестационных сессиях аспирантов ФГБОУ ВПО «РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина» (2012-2014 гг., г. Москва).

Публикации

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 14 печатных работах, в том числе: 6 научных статей, 4 из которых – в российских ведущих рецензируемых научных журналах по перечню ВАК при Минобрнауки РФ, 2 – в зарубежных официальных англоязычных переизданиях российских научных журналов; 7 тезисов докладов и 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов и результатов, списка литературы, включающего 136 наименований, и четырех приложений. Работа изложена на 198 страницах, в том числе приложения – 13 страниц, содержит 47 рисунков и 30 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и основные задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен аналитический обзор физических основ процесса и методов массовой кристаллизации твердых углеводородов из растворов, основных показателей производительности, технологических факторов и поточных схем промышленных процессов традиционной (физической) депарафинизации, конструкций оборудования для кристаллизации твердых углеводородов и путей повышения технологических показателей его работы на отделениях кристаллизации установок депарафинизации и обезмасливания.

Рассмотрены результаты исследовательских работ Д.Б. Кадырова (СамГТУ), В.Р. Нигматуллина (УГНТУ), В.Н. Меньшова (РГУНиГ им. И.М. Губкина) и др., касающихся совершенствования технологий процессов депарафинизации и обезмасливания и моделирования тепло- и массообмена при кристаллизации твердых углеводородов из растворов.

Проанализированы особенности конструкции и эксплуатации скребковых кристаллизаторов типа «труба в трубе», которые на сегодняшний день являются основными аппаратами отделений изогидрической кристаллизации установок депарафинизации масел с применением избирательных растворителей. Приведены технические и технологические недостатки кристаллизаторов этой конструкции. На основании технологических данных, накопленных в результате многолетнего опыта промышленной эксплуатации дисковых кристаллизаторов регенеративных (ДКР) на двух установках депарафинизации масел, сделан вывод, что наиболее оптимальным путем повышения показателей производительности установки депарафинизации является замена существующих кристаллизаторов «труба в трубе» перспективными аппаратами дискового типа.

Во второй главе проведен детальный обзор объекта диссертационного исследования – дискового кристаллизатора регенеративного, рассмотрены преиму-

щества ДКР над известными аналогами изогидрических кристаллизаторов: аппаратом типа «труба в трубе» и вертикальным дисковым кристаллизатором УкрНИИхиммаш с точки зрения эксплуатационных показателей и конструктивных факторов.

Исследования по разработке конструкции дискового кристаллизатора регенеративного и созданию технологии его эксплуатации на установках депарафинизации и обезмасливания в нефтеперерабатывающей промышленности, в начале XXI столетия проводил А.В. Вишнеvский. В СССР разработкой дисковых кристаллизаторов для химической и нефтехимической отраслей промышленности занимался институт УкрНИИхиммаш. Значительный вклад в создание данного оборудования и развитие технологии промышленной кристаллизации на основе его применения внесли следующие сотрудники института В.Г. Пономаренко, К.П. Ткаченко, С.Н. Беломытцев, Ю.И. Курлянд, В.Н. Бей, А.И. Калмычков и др.

Проведенный анализ физических процессов, протекающих в дисковом кристаллизаторе в ходе эксплуатации, показал, что в процессе работы он одновременно совмещает в себе функции массообменного и теплообменного аппарата (холодильника). Дано обоснование того, что вопросы интенсификации процессов тепло- и массообмена играют немаловажную роль в процессе кристаллизации из растворов, т.к. именно эти процессы определяют эффективность работы аппарата: его производительность, энергетические затраты, металлоемкость, качество получаемой суспензии и др. В результате сделан вывод, что эффективность работы изогидрических кристаллизаторов, к которым относится и ДКР, во многом определяется интенсивностью отвода тепла от суспензии, которая характеризуется величиной полного коэффициента теплопередачи K .

Исследован механизм теплообмена между потоками в ДКР и рассмотрены технологические факторы, влияющие на интенсивность теплопередачи в аппарате. Установлено, что при теплообмене в высоковязких средах в аппаратах с тихоходными мешалками, коэффициент теплоотдачи со стороны суспензии (в случае с ДКР – в междисковом пространстве) является основной величиной, лимитирующей значение коэффициента K .

Также отмечены проблемы, связанные со сложностью определения теплообменных характеристик аппаратов с перемешивающими устройствами (ПУ) как расчетными, так и экспериментальными способами. Обосновано применение компьютерного численного моделирования для расчета неизвестных значений коэффициентов теплоотдачи в междисковом и дисковом пространствах аппарата с целью определения значения полного коэффициента теплопередачи в ДКР.

На основании имеющегося опыта во многих исследовательских работах за определяющий параметр качества получаемой суспензии принят показатель дисперсности ее состава – средний линейный размер кристалла. Отмечено, что размер кристаллов в суспензии можно косвенно оценить по скорости ее прохождения через фильтр – чем выше скорость фильтрации FR , тем более крупные и качественные кристаллы парафина образовались в процессе охлаждения и кристаллизации. Результаты экспериментов по фильтрации парафиновых суспензий, полученных из рафинатов различных масляных фракций, показывают, что скорости фильтрации при многократном разбавлении рафината растворителем в процессе охлаждения в среднем на 22% выше, чем значения FR при однократном разбавлении сырья перед началом процесса (таблица 1).

Таблица 1 - Скорости фильтрации FR суспензий для растворов рафинатов различных масляных фракций

FR , $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$ (по рафинату)	Температурные пределы выкипания масляных фракций			
	330÷400°C	400÷470°C	470÷540°C	> 540°C
1 этап (однократное разбавление перед охлаждением)	143,8	122,1	90,0	55,0
2 этап (многократное разбавление в процессе охлаждения)	172,9	147,7	110,0	67,7

Приведенные данные свидетельствуют о получении суспензий с более крупными кристаллами парафина в составе в том случае, если разбавление сырья реализуется путем распределенного (многократного) ввода растворителя в поток.

Таким образом, обоснованы и предложены следующие способы повышения эффективности аппарата:

- Способ №1 заключается в повышении теплообменных характеристик ДКР, т.е. увеличении полного коэффициента теплопередачи между технологическими потоками за счет установки в корпус дополнительных перемешивающих устройств (ПУ), повышающих интенсивность перемешивания потока сырья;

- Способ №2 состоит в реализации распределенного ввода растворителя в междисковые камеры ДКР за счет установки распределительного устройства (РУ), что позволит обеспечить гибкость управления процессами охлаждения и кристаллизации и повысить скорости фильтрации получаемых суспензий.

Также определены соответствующие методы оценки для оптимизации конструкций ПУ и РУ, предназначенных для реализации предложенных способов повышения эффективности ДКР.

В результате проведенного аналитического обзора показаны необходимость и возможность повышения эффективности ДКР за счет интенсификации теплообмена и реализации распределенного ввода растворителя.

В третьей главе проведены комплексные исследования гидродинамики и теплообмена в ДКР.

Обоснован выбор расчетного программного модуля SolidWorks FlowSimulation, базирующегося на численном методе конечных объемов, для моделирования движения потоков в каналах ДКР сложной формы и теплообмена между ними с учетом наличия перемешивающего эффекта.

На основе использования известных аналитических зависимостей и программного комплекса HYSYS, разработаны реологические модели – определены функциональные температурные зависимости теплофизических характеристик (теплоемкости c , теплопроводности λ , плотности ρ , динамической вязкости η) от температуры T для растворов сырья и хладагентов-фильтратов различных масляных фракций, а также зависимости $c(T)$ и $\lambda(T)$ для стали марки 09Г2С.

Разработана трехмерная компьютерная гидро-теплодинамическая модель ДКР, предложен соответствующий математический алгоритм обработки расчет-

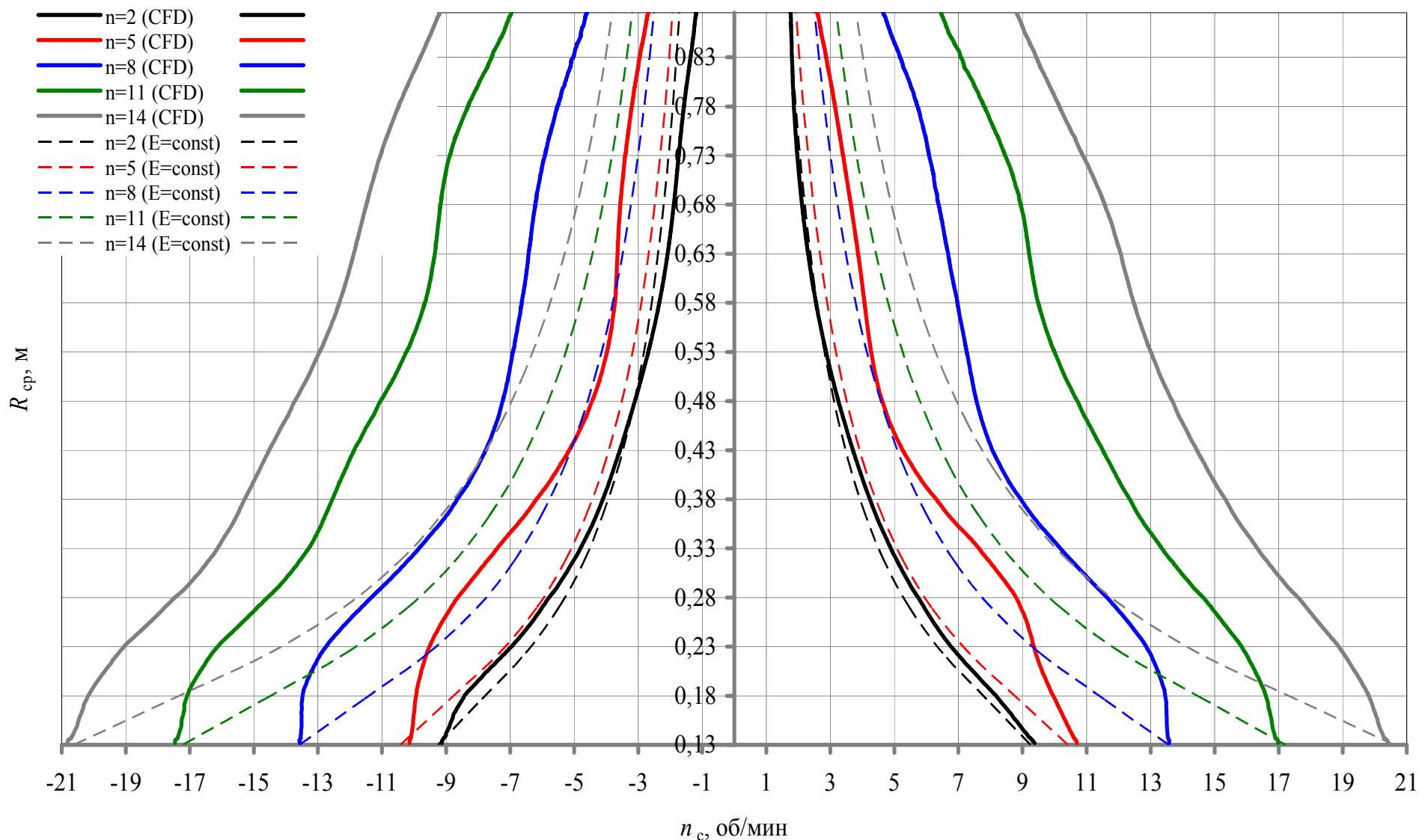
но-экспериментальных данных численного моделирования и проведена проверка адекватности модели реальным технологическим режимам работы ДКР. Установлено, что данная модель позволяет определить значения коэффициентов теплоотдачи в междисковом α_c и дисковом α_x пространствах аппарата и вычислить на их основе полный коэффициент теплопередачи кристаллизатора K с точностью до 10% для любого технологического режима работы ДКР.

Исследованы особенности гидродинамики сырьевого потока в междисковых камерах ДКР, определены его скорости и направление движения. Показано, что поток сырья, закрученный вокруг оси аппарата, движется последовательно по междисковым камерам, циклически изменяя скорость своего вращения n_c – ускоряясь при прохождении через центральные, и замедляясь при прохождении через периферийные кольцевые зазоры, за счет воздействия на него вращающихся ПУ и изменения осевого момента инерции. Построены теоретические и расчетно-экспериментальные графические зависимости частоты вращения потока n_c в промежуточных междисковых камерах ДКР от радиуса междисковой камеры R_{cp} при различных фиксированных частотах вращения приводного вала аппарата n (рисунок 1). Полученные данные подтверждают целесообразность реализации комплекса мер по Способу №1, который заключается в интенсификации теплообмена в ДКР за счет установки дополнительных ПУ.

На основе анализа критериальных уравнений подобия для теплообменных аппаратов с перемешиванием, определен вид функциональных зависимостей (1) средних значений коэффициентов теплоотдачи $\bar{\alpha}_c$ (от потока сырья к стенке охлаждающего диска) и $\bar{\alpha}_x$ (от стенки диска к потоку хладагента-фильтрата) от основных технологических параметров рабочего режима ДКР.

$$\bar{\alpha}_c = C_c \cdot \left(\frac{V_c}{\eta_c} \right)^i \cdot \left(\frac{n}{\eta_c} \right)^j; \quad \bar{\alpha}_x = C_x \cdot \left(\frac{V_x}{\eta_x} \right)^k, \quad (1)$$

где: V_c, V_x - объемные расходы потоков, м³/час; η_c, η_x - динамические вязкости потоков, Па·с; n - частота вращения приводного вала ДКР, об/мин; C_c, C_x - константы пропорциональности; i, j, k - показатели степеней.



Сплошная линия «—» - фактические скорости вращения (численное моделирование - CFD);
 Пунктирная линия «- - -» - теоретические скорости вращения (при постоянной кинетической энергии - $E = const$)
 Слева - движение потока сырья от центра к периферии междисковой камеры; Справа - движение потока сырья от периферии к центру
 Рисунок 1 - Зависимости частоты вращения сырьевого потока n_c от среднего радиуса междисковой камеры R_{cp} при разных частотах вращения вала ДКР n , об/мин

В результате расчетно-экспериментальных исследований и последующей обработки данных моделирования получены аналитические зависимости (2) для вычисления средних значений коэффициентов теплоотдачи в междисковом $\bar{\alpha}_c$ и дисковом $\bar{\alpha}_x$ пространствах кристаллизатора с точностью до 15% для любых технологических режимов работы аппарата.

$$\bar{\alpha}_c = 0,11 \cdot \frac{V_c^{0,206} \cdot n^{0,657}}{\eta_c^{0,863}}; \bar{\alpha}_x = 0,63 \cdot \left(\frac{V_x}{\eta_x} \right)^{0,685} \quad (2)$$

С учетом полученных зависимостей (2) становится возможным определение значения среднего полного коэффициента теплопередачи \bar{K} ДКР прямым вычислением по уравнению (3) с точностью до 15%.

$$\bar{K} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{\alpha}_c} + R_c + R_{ct} + R_x + \frac{1}{\bar{\alpha}_x}}, \quad (3)$$

где: R_c , R_x , R_{ct} - известные коэффициенты термического сопротивления, соответственно: слоя парафиновых отложений на внешней (с), слоя загрязнений на внутренней поверхностях диска (х) и материала стенки диска (ст), $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$.

В результате проведенных исследований были получены: адекватная гидротеплодинамическая модель ДКР; графические зависимости, описывающие характер движения сырьевого потока в междисковых камерах аппарата и математические уравнения, позволяющие вычислить теплотехнические характеристики ДКР.

В четвертой главе решаются задачи по разработке и оптимизации конструктивных решений для ПУ и РУ с целью реализации двух предложенных способов повышения эффективности ДКР.

Способ №1. Теоретически обоснован выбор типа, формы, расположения и проведена компьютерная оптимизация конструкции ПУ, предназначенных для установки в корпусе ДКР с целью интенсификации теплообмена между потоками без увеличения частоты вращения вала n и для обеспечения дополнительного выравнивания полей температур и концентраций в объеме раствора сырья.

Анализ данных по конструкциям аппаратов с перемешивающими устройствами показал, что в качестве перемешивающих элементов наиболее целесообразно

но применить турбинные мешалки открытого типа с радиальными, плоскими, прямоугольными лопатками полной длины – на весь радиус диска (рисунок 2). Лопатки расположены в плоскости вращения скребковых устройств на уже существующих кронштейнах, которые установлены на приводном валу ДКР.

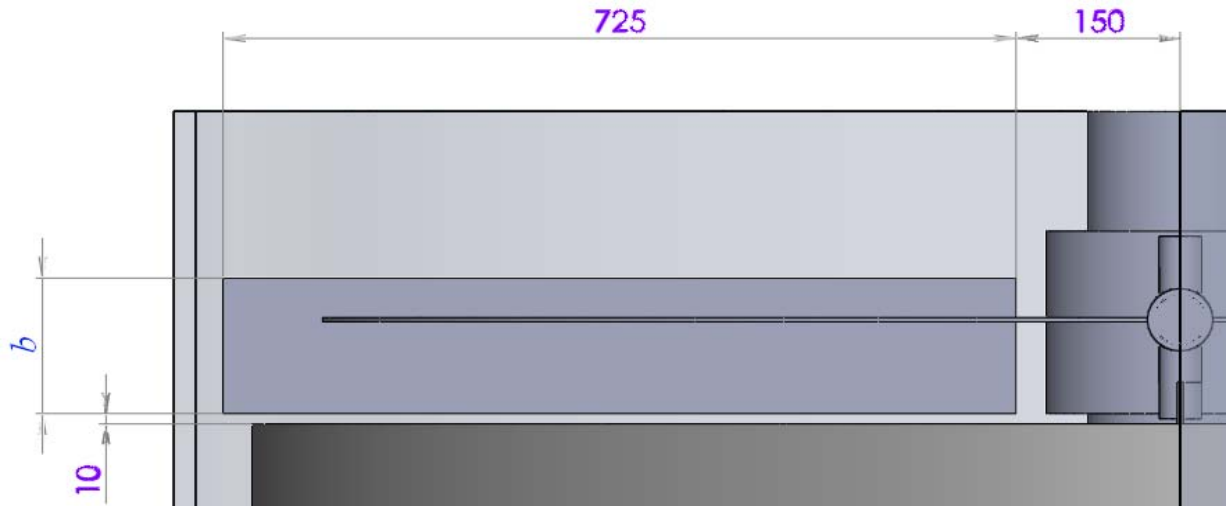


Рисунок 2 - Лопатка в междисковой камере кристаллизатора
(b - ширина лопатки ПУ)

Для определения оптимального конструктивного исполнения ПУ предложен метод оценки, заключающийся в достижении максимального значения коэффициента K между потоками при наименьших затратах мощности $P_{\text{пер}}$, расходуемой на перемешивание сырьевой смеси. Таким образом, сравнение различных конструктивных исполнений ПУ между собой рекомендуется проводить путем вычисления для каждого из них следующего отношения:

$$\Delta K / \Delta P_{\text{пер}}, \quad (4)$$

где: ΔK - приращение полного коэффициента теплопередачи за счет установки ПУ относительно значения K для базовой конструкции ДКР, Вт/(м²·К); $\Delta P_{\text{пер}}$ - приращение полной мощности на валу за счет увеличения доли мощности, дополнительно расходуемой на перемешивание сырья в результате установки ПУ, Вт.

Таким образом, то конструктивное исполнение ПУ, для которого отношение $\Delta K / \Delta P_{\text{пер}}$ принимает наибольшее значение, считается наиболее оптимальным, т.е. энергетически эффективным, по сравнению с другими вариантами.

Оптимизация конструкции перемешивающих лопаток заключается в опре-

делении такого сочетания их параметров – ширины b и количества z , при котором отношение (4) будет принимать максимальное значение. При решении задачи оптимизации, величины параметров b и z варьировались в следующих диапазонах $b \in [90; 110; 130; 155; 185; 220]$ мм и $z \in [2; 4; 6; 8; 10; 12]$ шт.

После выполнения серии расчетных экспериментов на гидро-теплодинамической модели ДКР, их результаты были обработаны по предложенному алгоритму с целью вычисления значений $\Delta K/\Delta P_{\text{пер}}$ для разных конфигураций параметров b и z (таблица 2). В итоге установлено, что наиболее оптимальным вариантом ($\max\{\Delta K/\Delta P_{\text{пер}}\}$) является конструкция ПУ с $z = 6$ лопатками шириной $b = 130$ мм (рисунок 3).

При этом абсолютный прирост значения коэффициента ΔK составил 37,1 Вт/(м²·К), а прирост мощности на перемешивание сырья – $\Delta P_{\text{пер}} = 1101,8$ Вт.

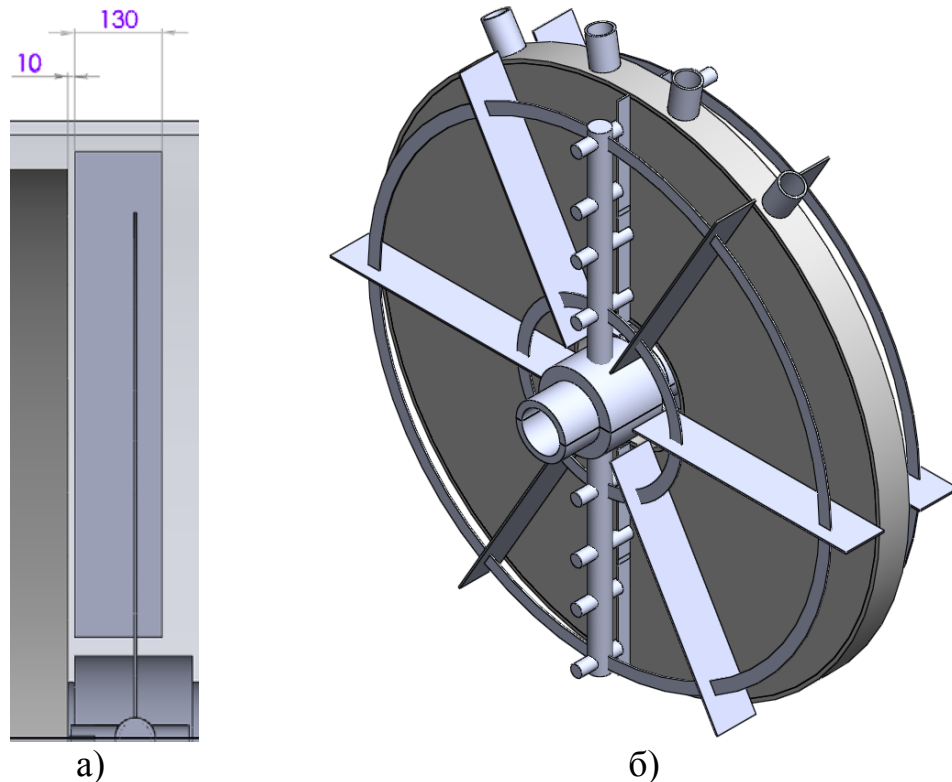
Таблица 2 - Расчетные значения отношения $\Delta K/\Delta P_{\text{пер}}$ (Вт/(м²·К)/кВт)

Параметры ПУ	Ширина лопатки b , мм					
	90	110	130	155	185	220
Количество лопаток z , шт.						
2	22,1	22,5	23,6	20,3	17,1	14,1
4	30,4	31,0	32,5	28,0	23,6	19,5
6	28,7	30,8	33,6	30,3	26,7	23,0
8	27,8	29,7	32,5	29,3	25,8	22,2
10	25,6	27,4	29,9	27,0	23,7	20,4
12	23,3	25,0	27,3	24,6	21,6	18,6

В результате показана возможность увеличения полного коэффициента теплопередачи дискового кристаллизатора K за счет установки оптимальной конструкции ПУ на $20 \pm 10\%$ по сравнению со значением K для ДКР без дополнительных внутренних устройств при аналогичных параметрах технологического режима работы аппарата.

Полученный прирост интенсивности теплообмена в ДКР позволит обеспечить более глубокую регенерацию холода фильтрата на блоке кристаллизации. Это даст возможность снизить эксплуатационные расходы установки депарафиниза-

ции в связи с уменьшением энергопотребления холодильного отделения за счет переноса доли тепловой нагрузки с испарительных кристаллизаторов на ДКР.



а) - лопатка ПУ с шириной $b = 130$ мм; б) - ПУ с числом лопаток $z = 6$ шт.

Рисунок 3 - Оптимальное исполнение перемешивающего устройства (ПУ)

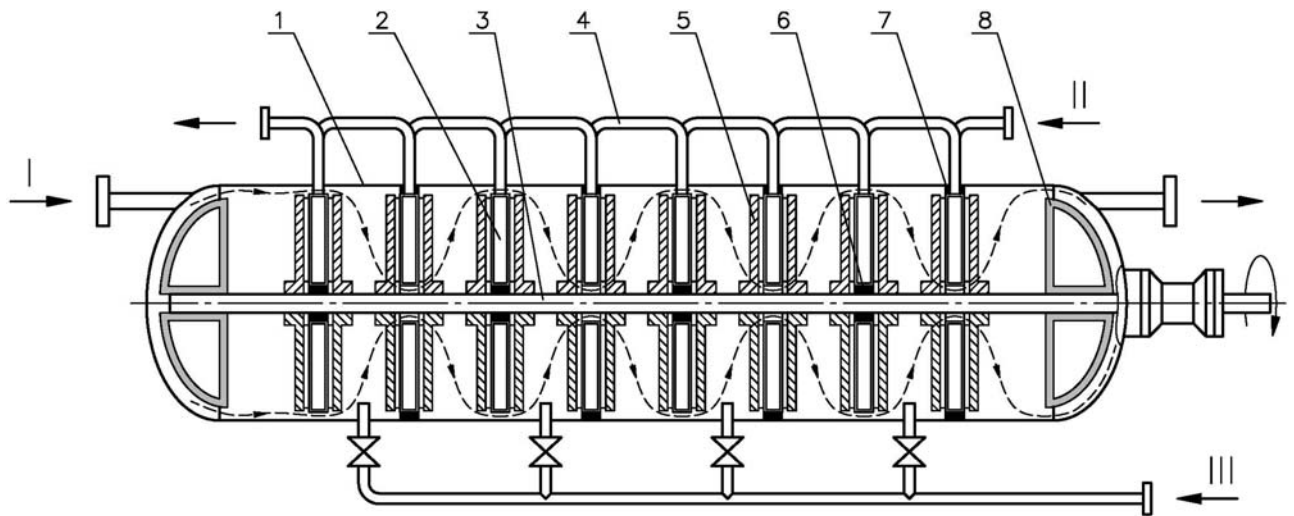
Расчетная оценка показала, что величина снижения энергетических затрат за счет сокращения расхода кипящего хладагента на доохлаждение сырья в испарительных аппаратах $\Delta P_{\text{охл}}$, превосходит прирост расхода мощности на перемешивание после установки ПУ $\Delta P_{\text{пер}}$ в $\Delta P_{\text{охл}}/\Delta P_{\text{пер}} = 9,3$ раза, что подтверждает экономическую целесообразность реализации Способа №1 по повышению эффективности ДКР.

Способ №2. Проведен теоретический анализ с целью выбора схемы распределенного ввода растворителя в междисковые секции ДКР и соответствующей конструкции РУ, выполнена компьютерная оптимизация конструктивных факторов распределителя.

Согласно результатам экспериментов (см. таблицу 1), при реализации технологического решения по распределенному вводу растворителя, обеспечиваются условия протекания процесса массовой кристаллизации, способствующие формированию более крупных и качественных кристаллов парафина при охлаждении

суспензии. Это позволяет повысить скорость ее фильтрации на вакуумных фильтрах в среднем на 22% в зависимости от фракционного состава сырья, что дает возможность увеличить производительность установки депарафинизации по сырью и снизить частоту «горячих» промывок фильтров.

Для обеспечения работоспособности данного решения и прогнозируемого технологического эффекта от его реализации в реальной конструкции ДКР, необходимо после ввода растворителя в корпус аппарата как можно более равномерно распределить его по раствору сырья во всем объеме междисковой камеры с целью предотвращения возникновения в объеме раствора локальных зон с концентрационной неоднородностью. Для этого ввод растворителя осуществлялся в те междисковые камеры ДКР, через которые поток сырья движется по направлению от периферийного кольцевого зазора к центральному (рисунок 4). Это позволяет достичь более полного смешения растворителя с сырьевым потоком до момента его перехода в следующую междисковую камеру аппарата.



Технологические потоки: I - раствор сырья; II - холодагент-фильтрат; III - растворитель

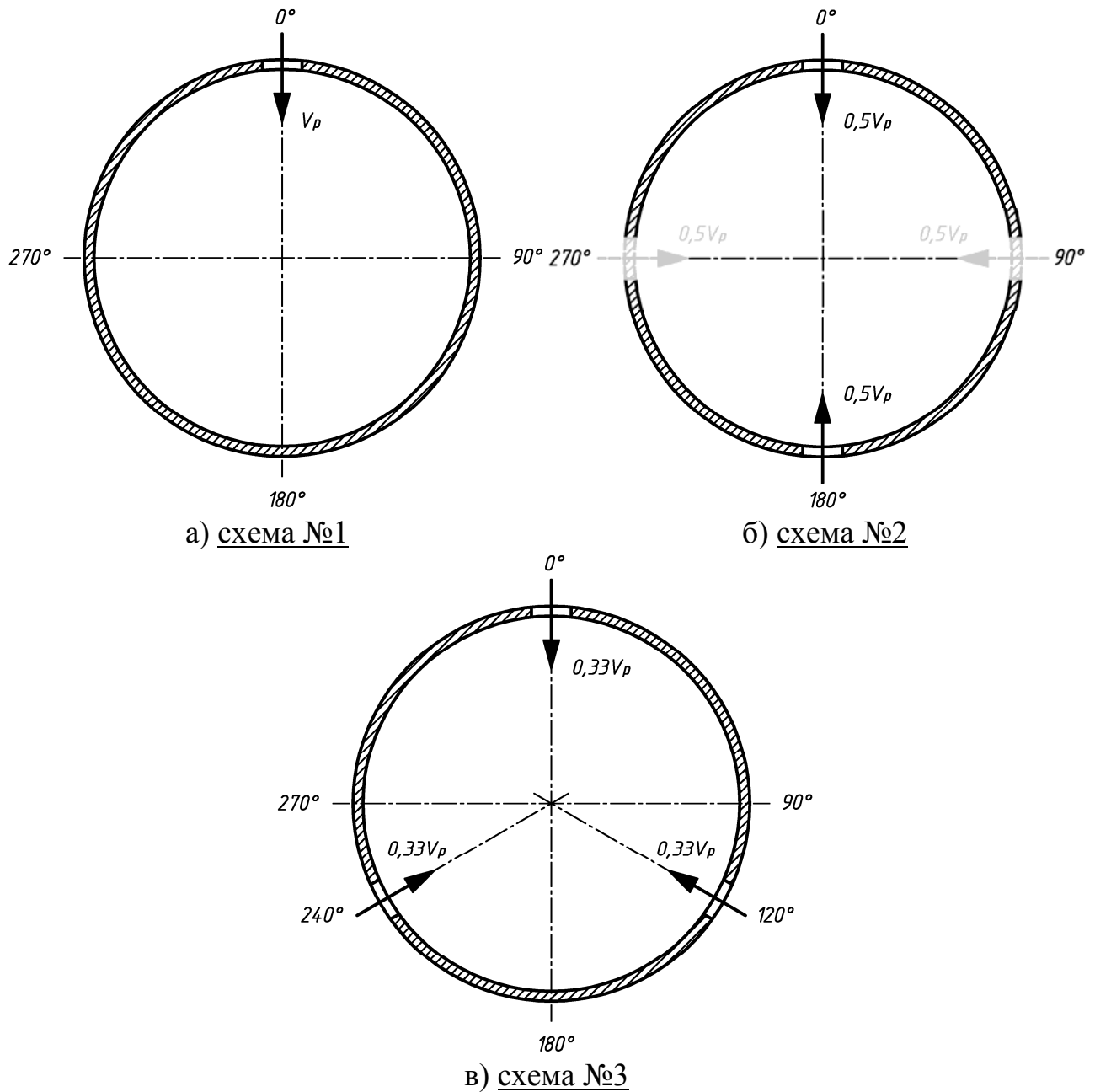
Основные элементы конструкции: 1 - цилиндрический корпус; 2 - охлаждающий диск; 3 - приводной вал; 4 - система переточных патрубков; 5 - скребковое устройство; 6 - центральное уплотнение; 7 - периферийное уплотнение; 8 - рамная мешалка

Рисунок 4 - Принципиальная схема ДКР с распределенным вводом растворителя

Для подачи растворителя в корпус, аппарат оснащен РУ (см. рисунок 4), представляющим собой трубопровод с четырьмя отводными патрубками, на каждом из которых установлены регуляторы расхода. Конструкцию РУ определяют

два фактора: 1) схема подачи растворителя – количество и расположение точек его ввода в междисковую камеру; 2) геометрия вводного патрубка – направление ввода растворителя в корпус.

С целью определения оптимальной конструкции РУ проведено расчетно-экспериментальное исследование, в рамках которого решалась задача оптимизации – рассматривались комбинации из трех схем подачи растворителя (рисунок 5) и четырех вариантов исполнения вводного патрубка (рисунок 6).



Обозначения: V_p - объемный расход растворителя в междисковую камеру, м³/час

Рисунок 5 - Схемы подачи растворителя в междисковую камеру

Для оптимизации конструкции распределителя предложен метод оценки,

закрывающийся в обеспечении наиболее полного выравнивания концентрации растворителя по всему объему сырьевой смеси после его ввода в междисковую камеру ДКР.

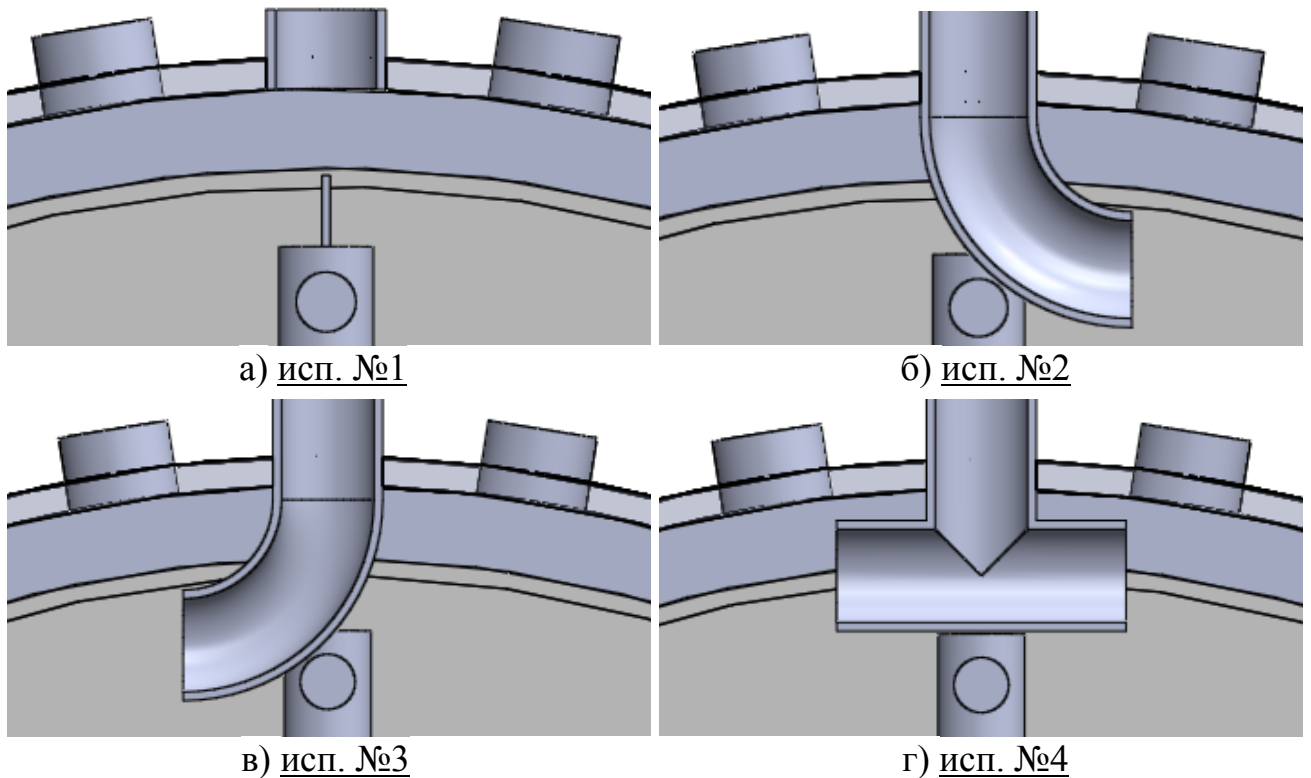


Рисунок 6 - Варианты исполнения узла ввода растворителя
(приводной вал кристаллизатора вращается по часовой стрелке)

Установлено, что сравнение различных конструкций РУ между собой целесообразно проводить путем вычисления для каждой из них величины процента объема междисковой камеры υ , в котором концентрация вводимого растворителя в сырьевой смеси достигает значений, соответствующих условиям (5) его равномерного распределения.

$$0,85 \cdot C_p^{\text{полн}} \leq \bar{C}_p \leq 1,15 \cdot C_p^{\text{полн}}, \quad (5)$$

где: \bar{C}_p - средняя объемная концентрация вводимого растворителя в сырье в междисковой камере, %; $C_p^{\text{полн}}$ - объемная концентрация растворителя, соответствующая его полному смешению с потоком сырья, %.

Оптимальным сочетанием двух указанных конструктивных факторов характеризуется то исполнение РУ, при реализации которого расчетное значение процента υ принимает максимальное значение. Обязательным для контроля условием

также является достижение полного смешения растворителя с сырьем, т.е. $\bar{C}_p = C_p^{\text{полн}}$, к моменту перехода потока в следующую междисковую камеру ДКР.

После выполнения серии расчетных экспериментов на гидро-теплодинамической модели ДКР, полученные данные моделирования были обработаны по предложенному алгоритму. В результате для каждой комбинации конструктивных факторов РУ – «исполнение - схема» рассчитано значение процента υ (таблица 3).

Таблица 3 - Значения процента объема междисковой камеры υ для различных сочетаний исполнений вводного патрубка и схем подачи растворителя (%)

Конструктивные факторы распределителя	№ исполнения вводного патрубка			
	№1	№2	№3	№4
№ схемы подачи растворителя				
№1	51,7	58,8	36,4	45,2
№2	59,6	67,7	41,9	52,0
№3	51,0	59,7	34,9	48,3

Анализ полученных данных (см. таблицу 3) показывает, что оснащение ДКР распределительным устройством (РУ), конструкция которого определяется сочетанием вводных патрубков исполнения №2 (см. рисунок 6, б), установленных в соответствии со схемой №2 (см. рисунок 5, б), позволяет выровнять концентрацию дополнительно вводимого растворителя до заданных значений (5) приблизительно в 70% объема сырьевой смеси в междисковой камере ($\max\{\upsilon\}$) и обеспечить полное смешение растворителя с потоком сырья ($\bar{C}_p = C_p^{\text{полн}}$) к моменту перехода последнего в следующую междисковую камеру аппарата. Таким образом, полученные результаты демонстрируют возможность реализации технологического решения, позволяющего увеличить скорость фильтрации суспензии на 22%, за счет применения оптимальной конструкции РУ для реализации распределенного ввода растворителя в ДКР.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1 Разработана численная компьютерная гидро- теплодинамическая модель ДКР, адекватно воспроизводящая условия рабочего режима аппарата, и предложен соответствующий алгоритм обработки данных моделирования, позволяющие определить значения коэффициентов теплоотдачи в междисковом и дисковом пространствах и вычислить на их основе полный коэффициент теплопередачи ДКР с точностью до 10%;

2 Получены графические зависимости частоты вращения потока сырья от радиуса междисковой камеры ДКР при различных частотах вращения приводного вала аппарата;

3 Определены аналитические зависимости средних коэффициентов теплоотдачи потоков в междисковом и дисковом пространствах ДКР от технологических параметров рабочего режима аппарата, позволяющие вычислить их значения с точностью до 15%, получена возможность определения среднего полного коэффициента теплопередачи ДКР прямым вычислением по исходным данным режима работы аппарата с точностью до 15%;

4 Предложен способ интенсификации теплообмена в ДКР и определены методы оценки для оптимизации конструктивных решений в соответствии с которыми разработана и оптимизирована конструкция перемешивающего устройства, установка которого в междисковых камерах ДКР позволяет увеличить полный коэффициент теплопередачи ДКР на $20\pm 10\%$ и повысить энергоэффективность холодильного отделения установки депарафинизации;

5 Предложена схема распределенного ввода растворителя в корпус ДКР и определены методы оценки для ее оптимизации в соответствии с которыми разработана и оптимизирована конструкция распределительного устройства, позволяющая реализовать технологическое решение по повышению скорости фильтрации суспензии в среднем на 22% за счет обеспечения наиболее полного выравнивания концентрации вводимого растворителя в аппарате.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

По материалам диссертации опубликовано 14 работ, в том числе:

В российских ведущих рецензируемых научных журналах по перечню ВАК при Минобрнауки РФ:

1. Вишнеvский, А.В. Опыт эксплуатации дискового кристаллизатора / А.В. Вишнеvский, А.Г. Вихман, С.С. Круглов [и др.] // Химия и технология топлив и масел. – 2011. № 5. – С. 13.

2. Вишнеvский, А.В. Определение коэффициента теплопередачи в дисковом регенеративном кристаллизаторе / А.В. Вишнеvский, С.С. Круглов (мл.), В.А. Лукьянов [и др.] // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2013. – № 2. – С. 43.

3. Вишнеvский, А.В. Численное моделирование теплообмена в дисковом регенеративном кристаллизаторе новой конструкции / А.В. Вишнеvский, С.С. Круглов, В.А. Лукьянов // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2013. – № 2 (271). – С. 64.

4. Вишнеvский, А.В. Холодопроизводительность дискового кристаллизатора в процессе депарафинизации масел / А.В. Вишнеvский, С.С. Круглов (мл.), С.С. Круглов (ст.) [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 8. – С. 19.

В зарубежных официальных англоязычных переизданиях российских научных журналов:

5. Vishnevskii, A.V. Operating experience with a disk-shaped crystallizer / A.V. Vishnevskii, A.G. Vikhman, S.S. Kruglov [and others] // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. Springer Science+Business Media, Inc. – November, 2011. – Vol. 47. – No.5. – P. 346-350.

6. Vishnevskiy, A.V. Refrigerating capacity of disk crystallizer in oil dewaxing process / A.V. Vishnevskiy, S.S. Kruglov, Jr., S.S. Kruglov, Sr. [and others] // Chemical and Petroleum Engineering. Springer Science+Business Media New York. – November, 2013. – Vol. 49. – Nos.7-8. – P. 522-527.

Тезисы докладов в материалах конференций:

7. Круглов, С.С. Численное моделирование теплообмена в дисковом скребковом регенеративном кристаллизаторе новой конструкции [Тезисы доклада] / С.С. Круглов, В.А. Вишнеvский // IV-ая Научно-практическая конференция «Перспективные технологии подготовки, переработки нефти и газа». 15 ноября 2012 г.: Сборник тезисов. – Респ. Башкортостан, Туймазы : ОАО «УТС-Туймазыхиммаш». – 2012. – С. 12.

8. Круглов, С.С. Повышение эффективности дискового скребкового регенеративного кристаллизатора для процессов депарафинизации и обезмасливания [Тезисы докла-

да] / С.С. Круглов, В.А. Лукьянов, А.В. Вишневский // IX-ая Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России». 30 января - 1 февраля 2012 г.: Тезисы докладов / Ред. кол.: В.Г. Мартынов (отв. ред.) [и др.]. – М. : РГУНиГ имени И. М. Губкина. – 2012. – С. 28.

9. Круглов, С.С. Повышение холодопроизводительности дискового регенеративного кристаллизатора [Тезисы доклада] / С.С. Круглов, В.А. Лукьянов, А.В. Вишневский // X-ая Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России». 10-12 февраля 2014 г.: Тезисы докладов / Ред. кол.: В.Г. Мартынов (отв. ред.) [и др.]. – М. : РГУНиГ имени И. М. Губкина. – 2014. – С. 227.

10. Круглов, С.С. Повышение эффективности дискового скребкового регенеративного кристаллизатора для процессов депарафинизации и обезмасливания [Тезисы доклада] / С.С. Круглов // 66-ая Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ - 2012». 17-20 апреля 2012 г.: Сборник тезисов / Ред. кол.: В.Г. Мартынов (отв. ред.) [и др.]. – М. : РГУНиГ имени И.М. Губкина. – 2012. – С. 28.

11. Круглов, С.С. Определение коэффициента теплопередачи в дисковом регенеративном кристаллизаторе [Тезисы доклада] / С.С. Круглов // 67-ая Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ - 2013». 9-12 апреля 2013 г.: Сборник тезисов / Ред. кол.: В.Г. Мартынов (отв. ред.) [и др.]. – М. : РГУНиГ имени И.М. Губкина. – 2013. – С. 44.

12. Круглов, С.С. Дисковый кристаллизатор с комбинированным методом кристаллизации парафина [Тезисы доклада] / С.С. Круглов // 68-ая Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ - 2014». 14-16 апреля 2014 г.: Сборник тезисов / Ред. кол.: В.Г. Мартынов (отв. ред.) [и др.]. – М. : РГУНиГ имени И.М. Губкина. – 2014. – С. 49.

13. Круглов, С.С. Исследование и модернизация кристаллизатора дискового типа для процессов производства масел [Тезисы доклада] / С.С. Круглов // 69-ая Международная молодежная научная конференция «Нефть и газ - 2015». 14-16 апреля 2015 г.: Сборник тезисов. Т. 2 / Ред. кол.: В.Г. Мартынов (отв. ред.) [и др.]. – М. : РГУНиГ имени И.М. Губкина. – 2015. – С. 50.

Патент РФ на полезную модель:

14. Пат. на пол. мод. № 139340 РФ, МПК C10G 73/32, B01D 9/02. Устройство для охлаждения и кристаллизации парафинсодержащего углеводородного сырья / Вишневский А.В., Паташников Г.Л., Круглов С.С.; патентообладатели Вишневский Анатолий Викторович, Паташников Григорий Львович. – № 2014103302/04; заявл. 31.01.2014; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11.