

На правах рукописи

Богаткова

Богаткова Анастасия Викторовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ НА
ОСНОВЕ ДВУХФАЗНЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОТОКОВ В
ТЕХНОЛОГИЯХ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ**

05.21.03 – Технология и оборудование химической переработки биомассы
дерева; химия древесины

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Красноярск – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Войнов Николай Александрович

Официальные оппоненты:

Лаптев Анатолий Григорьевич доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», кафедра инженерная экология, профессор

Юрьев Юрий Леонидович доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет, кафедра химической технологии древесины, биотехнологии и наноматериалов, профессор

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Защита диссертации состоится «22» сентября 2022 года в 15⁰⁰ ч на заседании диссертационного совета Д 212.249.07 в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» по адресу: 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 82, аудитория Ц-110 (зал заседаний).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 660049, г. Красноярск, пр. Мира, 82, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, ученому секретарю диссертационного совета.

E-mail: dissovetsibgtu01@mail.ru

В отзыве указываются фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица, представившего отзыв (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», на сайте: www.sibsau.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Исаева Елена Владимировна

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Вращающееся движение двухфазных газожидкостных потоков в технологических установках применяется при подготовке гидролизатов древесины и ферментативных сред на их основе, охлаждении оборотной воды, аэрации, очистке газовых выбросов целлюлозно-бумажных предприятий, ректификации при получении этанола и продуктов лесохимической промышленности, испарении, выпаривании, сушке, фракционировании и сортировке целлюлозной массы.

Вихревые устройства применяются в скрубберах, на тарелках ректификационных колонн, выпарных аппаратах, вакуум охладительных установках, циклонах, градильных, а также получили распространение в газовых турбинах, камерах сгорания, центробежно-вихревых деаэратах, сепараторах.

Широкое применение вращающихся потоков газа и жидкости обусловлено достижением существенной интенсификации переноса тепла и массы в используемых на практике аппаратах, по сравнению с известными распространенными способами взаимодействия газа и жидкости.

Одним из основных требований при конструировании вихревых аппаратов является создание устройств, для вращения потока с низким гидравлическим сопротивлением, большой эффективности и пропускной способности по жидкости или газу.

Для разработки эффективных вихревых контактных устройств и контактных ступеней необходимы проверенные зависимости для определения: режимов течения фаз, гидравлического сопротивления завихрителя, газосодержания, угловой скорости газожидкостной смеси, межфазной поверхности, коэффициентов массоотдачи и эффективности.

Несмотря на многочисленные исследования, проведенные в этой области, известные данные требуют их обобщения, с учетом специфики рассматриваемых производств. В данной работе проведены экспериментальные исследования, и использованы возможности численного моделирования потоков для совершенствования тангенциальных завихрителей, контактной ступени бражной колонны, вихревого физического коагулятора и установки улавливания мелочи из суспензии размолотой целлюлозы.

Изложенные в диссертации результаты получены в ходе выполнения работ по проекту «Технология и оборудование химической переработки биомассы растительного сырья» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер темы FEFE-2020-0016).

Цель работы: Разработать научные основы расчета параметров вращающегося газожидкостного потока, исследовать структуру газожидкостного слоя на тарелке, кинетику осаждения мелочи размолотой целлюлозы для совершенствования контактных устройств.

Задачи исследования:

Для достижения цели сформулированы следующие задачи:

– установить зависимости для расчета гидродинамических и массообменных параметров вращающегося газо-жидкостного потока;

- разработать новые конструкции тангенциальных завихрителей, выявить влияние конструктивных и технологических параметров этих устройств на величину коэффициента сопротивления, получить уравнение для его расчета;

- обосновать структуру газожидкостного слоя на ступени с различными контактными устройствами, разработать контактные устройства тарелки бражной колонны;

- исследовать процесс осаждения мелочи целлюлозы в суспензии прошедшей через вихревой физический коагулятор, разработать установку для улавливания.

Объект исследований. Гидродинамика и массоперенос во вращающемся газожидкостном потоке, кинетика осаждения мелочи целлюлозы, структура газожидкостного потока на ступени.

Предмет исследований. Завихрители, вихревые контактные устройства и ступени, физический коагулятор для суспензии мелочи сульфатной блененной лиственной и хвойной целлюлозы, а также макулатуры.

Научная новизна работы:

- впервые установлены зависимости для расчета гидродинамических и массообменных параметров вращающегося потока: критической скорости газа, угловой скорости, газосодержания, межфазной поверхности, коэффициента массоотдачи;

- получены новые данные, а также уравнение для расчета коэффициента гидравлического сопротивления, позволяющие разрабатывать завихрители с заданным сопротивлением в широком интервале варьирования конструктивных и технологических параметров, с учетом гидродинамики потока на основании анализа профилей скоростей, давления;

- установлены профили скоростей фаз и газосодержание в газожидкостном слое на тарелке с различными контактными устройствами;

- впервые представлены результаты кинетики осаждения мелочи в суспензии размолотой целлюлозы, пропущенной через вихревой физический коагулятор и установлена связь между размером хлопьев и концентрацией суспензии.

Практическая значимость работы:

- разработаны новые конструкции завихрителей с профилированными и кольцевым каналами и представлены рекомендации для их расчета;

- разработаны вихревая тарелка бражной колонны и установка для улавливания мелочи;

- предложен способ осаждения хлопьев мелочи в суспензии, прошедшей через вихревой физический коагулятор;

- получены патенты на устройства для двухфазных вращающихся потоков.

Положения, выносимые на защиту:

- зависимости для определения гидродинамических и массообменных параметров вращающегося потока;

- гидродинамические параметры тангенциальных завихрителей и уравнение для расчета коэффициента гидравлического сопротивления;

- структура газожидкостного слоя на ступени с различными контактными

устройствами;

- размер мелочи, выделенной из волокнистой массы хвойной и лиственной целлюлозы, а также кинетика осаждения;
- тарелка с вихревыми контактными устройствами и установка для улавливания мелочи размолотой целлюлозы.

Соответствие паспорту специальности.

Представленная работа соответствует паспорту специальности 05.21.03 – Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины (п. 17 – Оборудование, машины, аппараты и системы автоматизации химической технологии биомассы дерева).

Степень достоверности результатов работы. Достоверность научных положений и выводов обеспечена использованием в работе проверенных методов эксперимента и современной аналитической техники, а также статистической обработкой результатов.

Апробация работы.

Материалы диссертации были представлены на международных научно-практических конференциях: «Химия нефти и газа» (Томск, 2020); «Решетневские чтения» (Красноярск, 2020); «APITECH: Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг» (Красноярск, 2020, 2021); «SAMSTech: Современные достижения в области материаловедения и технологий» (Красноярск, 2021); всероссийских научно-практических конференциях: «Экология, рациональное природопользование и охрана окружающей среды» (Лесосибирск, 2017); «Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья» (Барнаул, 2020); «Лесной и химический комплексы – проблемы и решения» (Красноярск, 2016-2021); «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (Красноярск, 2016-2021).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 39 работ, из них 11 – в изданиях, индексируемых базой SCOPUS, 5 – в изданиях, входящих в перечень ВАК, получено 2 патента Российской Федерации.

Личный вклад автора заключается в проведении экспериментов по исследованию гидродинамических параметров; обработке и анализе результатов; подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, основных выводов, библиографического списка из 123 наименований. Основной текст изложен на 119 с., включает 70 рисунков, 7 таблиц и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность использования вращающихся потоков на ступенях массообменных аппаратов и в физическом коагуляторе для укрупнения мелочи размолотой целлюлозы.

Глава 1 Анализ контактных устройств, ступеней, параметров вращающегося потока и влияние мелочи размолотой целлюлозы. В диссертационной работе проведен анализ завихрителей, контактных устройств и ступеней. Проанализированы известные математические зависимости для расчета параметров вращающегося двухфазного потока. Рассмотрено влияние мелочи размолотой целлюлозы на производства и установлены конструкции физических коагуляторов.

Глава 2 Методическая часть. Приведены схемы исследованных завихрителей, рисунок 1, и экспериментальных ступеней, рисунок 2. Завихрители выполнялись по 3D модели на станке с ЧПУ по технологии послойной печати.

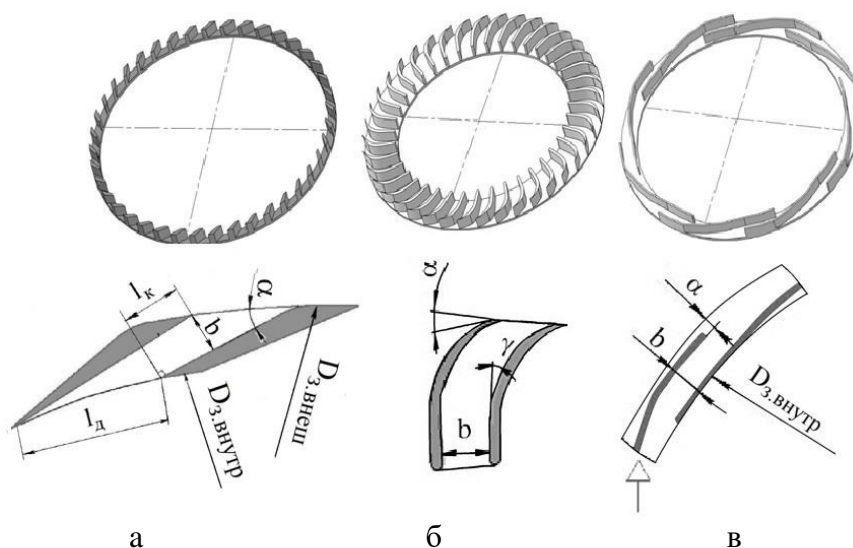


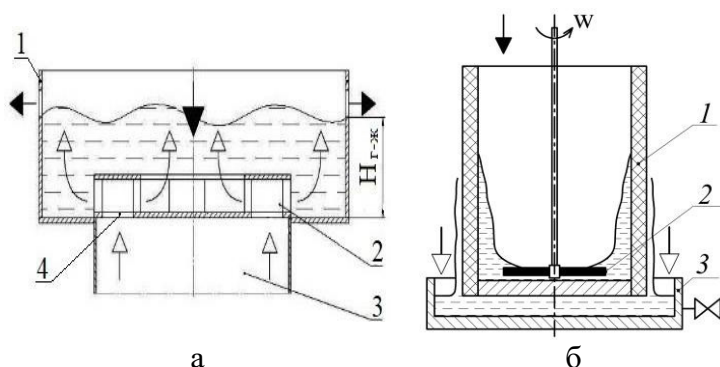
Рисунок 1 – Схемы исследованных тангенциальных завихрителей с прямыми стенками каналов (а), профилированными (б), кольцевыми (в)

Внешний диаметр завихрителя варьировался от 65 до 205 мм, ширина их каналов изменялась от 1,2 до 9 мм, высота – 1,5 – 10 мм, число каналов составляло от 5 до 45 шт., угол наклона стенки каналов 26° – 90° .

Для изучения гидродинамических параметров завихрителя, получения полей скорости и перепада давления был применен метод численного моделирования в программе Comsol Multiphysics.

При моделировании диаметр газового патрубка завихрителя принимался равным 0,12 м, высота канала 0,008 – 0,08 м, ширина 0,0015 – 0,006 м, угол наклона канала составил 26° и 45° , количество каналов изменялось от 4 до 40 шт., длина каналов составила 0,002 – 0,022 м.

Схемы твердотельной модели и линии считывания перепада давления показаны на рисунке 3.



а) 1 – царга, 2 – завихритель, 3 – газовый патрубок, 4 – каналы для входа газа; → – жидкость; ↗ – газ; б) 1 – пористый цилиндр; 2 – диск; 3 – емкость; → – суспензия; ↗ – суспензия, после физической коагуляции

Рисунок 2 – Схема контактной ступени (а) и физического коагулятора с вращающимся диском (б)

В качестве рабочих сред использовались: воздух, водяной пар, вода, смесь этанол-вода, суспензия мелочи, полученная из лиственной и хвойной размолотой сульфатной целлюлозы со степенью помола 30 – 70 °ШР и концентрацией волокна 3 – 20 %, макулатура со степенью помола 70 °ШР. Мелочь размолотой целлюлозы отбиралась после прохождения ее через сеточную часть отливной машины с размером ячейки сетки 250 мкм.

В качестве пористой насадки физического коагулятора использовались цилиндрические фильтры: ЭФВП–СТ–100 толщиной стенки 7,5 мм, а также фильтр марки Hengko, спрессованный из титановой крошки, с толщиной стенки 10 мм, с размером пор 200 – 250 мкм.

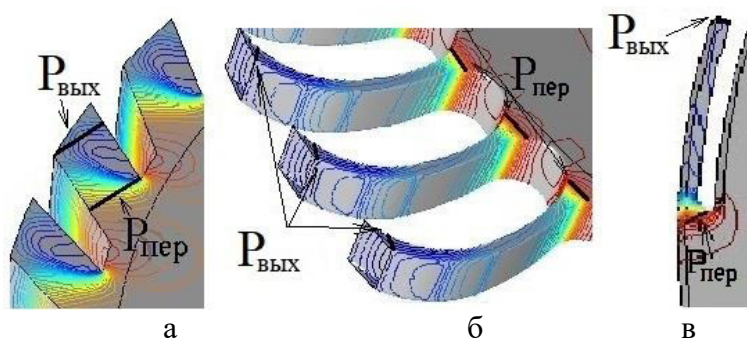


Рисунок 3 – модели, используемые при обработке эпюр давления для прямых (а), профилированных (б) и кольцевых каналов (в)

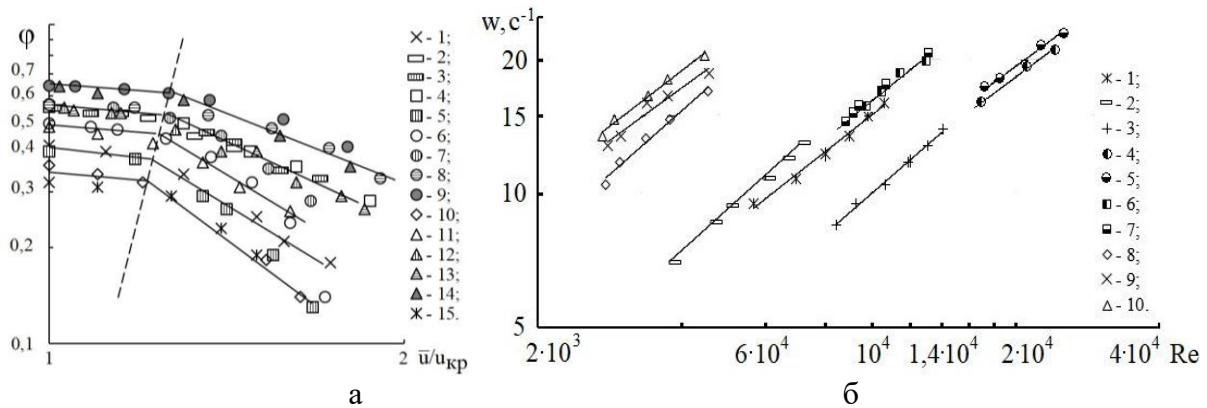
микрористаллической целлюлозы был проведен на кафедре МАПТ СибГУ им. М.Ф. Решетнева к.т.н., доцентом Юртаевой Л. В.

Для математической и статистической обработки экспериментальных данных была использована программа Microsoft Excel. Полученные результаты не выходят за предел доверительной вероятности 0,9.

Глава 3 Параметры вращающегося газожидкостного потока. Экспериментально определены параметры вращающегося газожидкостного потока.

Зависимости изменения газосодержания на ступени и угловой скорости жидкости при испытании различных типов завихрителей показаны на рисунке 4.

Для изучения параметров мелочи использовался цифровой микроскоп Hitachi SU 3500, а также анализатор мелочи Morfi Neo. Для определения степени полимеризации целлюлозы использовался вискозиметрический метод. Гидролиз мелочи размолотой целлюлозы с получением



Экспериментальные точки: а) (1 – 15): профилированные каналы (1 – 10): 1 – завихритель № 13; (2 – 3) – № 14; (4 – 5) – № 16; (6 – 9) – № 19; 10 – № 18; кольцевые каналы (11 – 15): завихритель № 21 (11 – 14); 15 – завихритель № 23; б) профилированные каналы (1 – 8): 1 – завихритель № 13; 2 – № 14; 3 – № 15; (4 – 5) – № 19; (6 – 7) – № 18; (8 – 10) – прямые каналы № 2

Рисунок 4 – Изменение газосодержания от отношения скоростей (а) и угловой скорости газо-жидкостного потока от числа Рейнольдса газа в канале завихрителя (б)

Обобщение данных позволило получить зависимость для определения газосодержания в барботажно-кольцевом режиме:

$$\phi = 0,9 \cdot (H_{г-ж}/D_{ст})^{0,4} \cdot (\sigma_0/\sigma)^{0,25}, \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения воды, Н/м; σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения воды при температуре 20 °С, Н/м; $H_{г-ж}$ – высота газожидкостного слоя, м; $D_{ст}$ – диаметр ступени, м.

Величина газосодержания в кольцевом режиме

$$\phi = A_1 \cdot (\bar{u}/u_{кр})^{-2,4}, \quad (2)$$

где A_1 определяется при совместном решении уравнения (1) и (2) и $\bar{u}/u_{кр}=1,25$.

Угловая скорость газо-жидкостного потока подчиняется зависимости:

$$w = 12,5 \cdot (Re/Re_{кр})^{0,8} \cdot (D_{ст}/D_{з.внеш})^{-0,7}. \quad (3)$$

Критическая скорость газа в каналах завихрителей, при которой осуществляется вращательное движение жидкости на ступени $u_{кр}$, согласуется с данными (Ледник А.С., 2013).

Изменение межфазной поверхности от диссипации энергии газа представлено на рисунке 5.

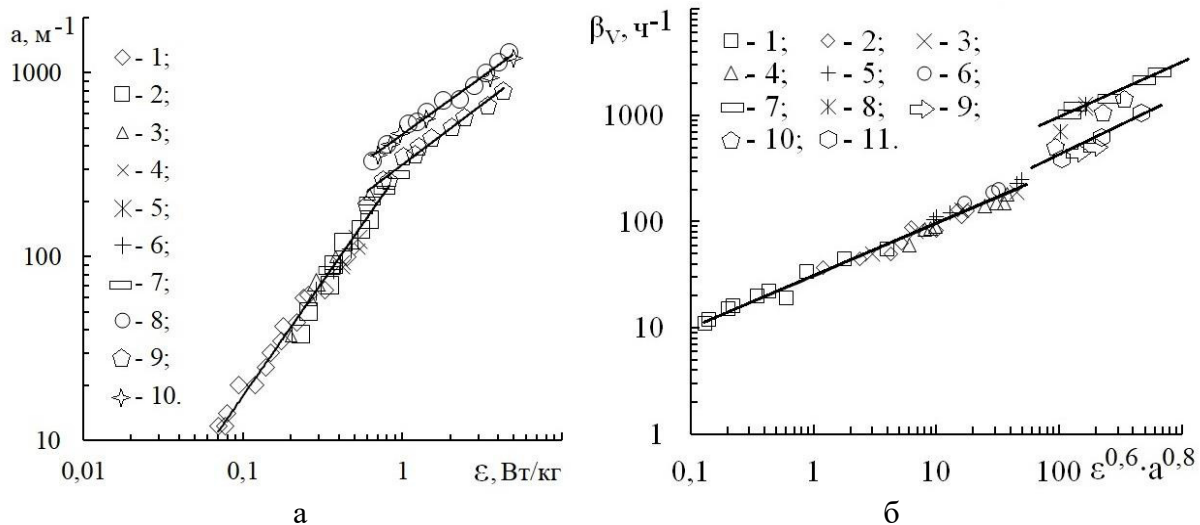
Получена зависимость для расчета коэффициента массоотдачи в виде:

$$\beta_v = A \cdot [\varepsilon^{0,6} \cdot a^{0,8}]^{0,45}, \quad (4)$$

где a – удельная межфазная поверхность, $м^{-1}$; ε – диссипация газа в жидкости, Вт/кг; β_v – коэффициент массоотдачи, $ч^{-1}$.

Величина коэффициента A при барботажном режиме равна 30, а в барботажно-кольцевом для завихрителя с кольцевыми каналами – $A = 136$.

Выражение (4) с относительной погрешностью 20 % обобщает массив экспериментальных данных полученных при плотности орошения $0,9 - 26 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и скорости газа в каналах завихрителя $10 - 60 \text{ м/с}$.



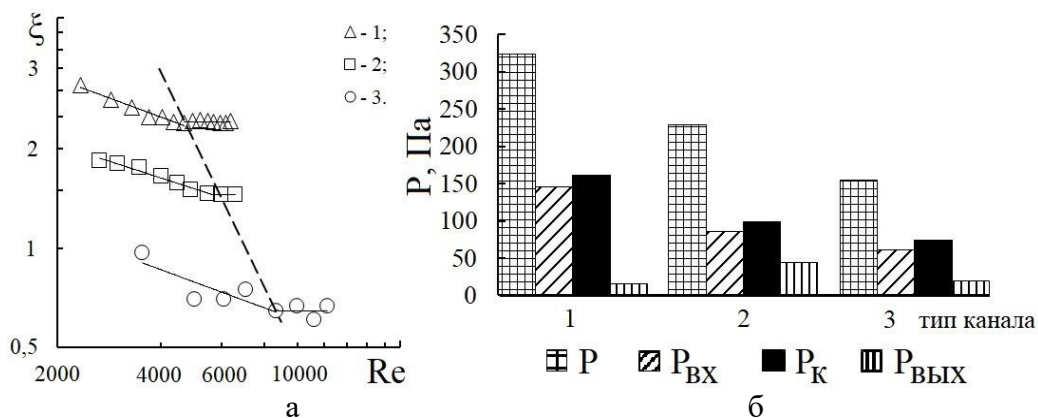
Экспериментальные точки: а) (1 – 7) при установке трубчатого барботера диаметром 20 мм, $d_{\text{отв}} = 1,5 - 5 \text{ мм}$, $D_{\text{ст}} = 0,3 - 0,52 \text{ м}$, $H_{\text{г-ж}}/D_{\text{ст}} = 0,27 - 1,4 \text{ м}$, $n = 12 - 68 \text{ шт}$; 8 – завихритель № 25, 9 – № 19 при $n = 4 \text{ шт}$, 10 – № 20; б) (1 – 11): (1 – 6) – данные с рисунка 5а; 7 – завихритель № 25; 8 – № 23; 9 – № 14; 10 – № 19; 11 – № 20

Рисунок 5 – Зависимость межфазной поверхности от диссипации энергии газа (а) и коэффициента массоотдачи от параметра $\varepsilon^{0,6} \cdot a^{0,8}$ (б)

Величина поверхностного коэффициента массоотдачи во вращающемся газо-жидкостном потоке составила $(0,5 - 0,8) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$.

Глава 4 Экспериментальное исследование и численное моделирование гидродинамики тангенциальных завихрителей.

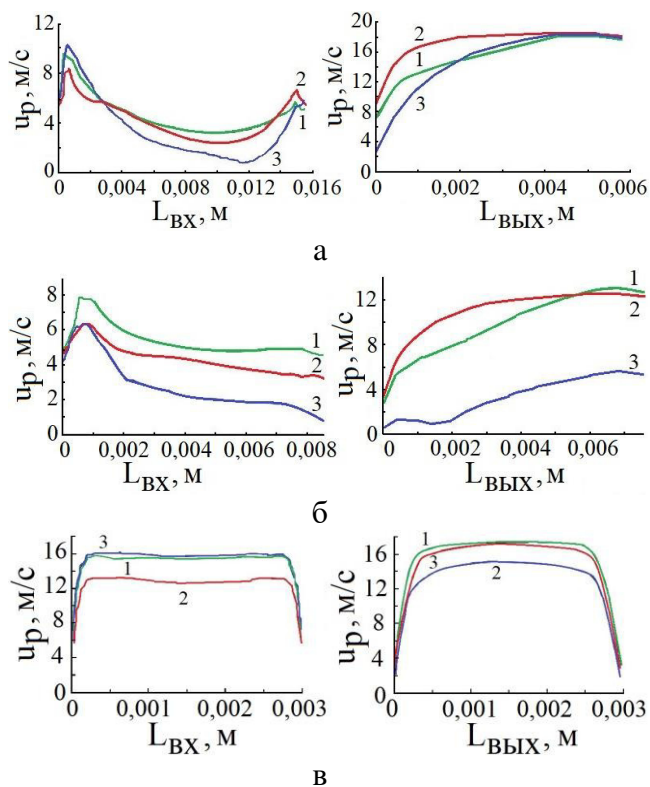
Сравнение величины коэффициента сопротивления трех типов тангенциальных завихрителей представлено на рисунке 6. Наименьшее сопротивление имеет контактное устройство с кольцевыми каналами, что обусловлено наличием одной кромки у стенки на входе в канал, а также условиями формирования профиля скорости газа.



Тип канала (точки): (1 – 3): 1 – завихритель с прямыми стенками каналов; 2 – профилированные, 3 – кольцевые; а) экспериментальные данные; б) моделирование

Рисунок 6 – Зависимость величины коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса (а) и распределение давления для трех типов завихрителей (б) на входе, в канале и на выходе

Согласно данным рисунка 6б, завихритель с кольцевыми каналами имеет в 2,4 раза меньшие потери на входе в сравнении с прямыми стенками каналов и в 1,4 раза по сравнению с профилированными. Потери давления на выходе у всех сравниваемых завихрителей сопоставимы. Для установления влияния конструктивных и технологических параметров новых и известных завихрителей на их сопротивление проведены экспериментальные исследования и численное моделирование и достигнуто их соответствие.



(а) $\alpha = 26^\circ$; (б) $\alpha = 45^\circ$; (в) $\alpha = 90^\circ$. Измерительные линии (1 – 3) по высоте канала: 1 – $h = 0,004$ м; 2 – $h = 0$; 3 – $h = 0,008$ м

Рисунок 7 – Изменение полной скорости u_p для завихрителей с прямыми стенками канала по измерительной линии на входе канала L_{BX} и на выходе L_{VYX} при $b = 0,003$ м, $h = 0,008$ м, $\bar{u} = 14$ м/с

завихритель с прямыми стенками канала, $A = 751$ – профилированные каналы; $A = 1571$ – кольцевые каналы; $j = 0,281$ для прямых и профилированных каналов, $j = 0,396$ для кольцевых каналов; $q = 0,13$ для прямых и профилированных каналов, $q = 0$ для кольцевых каналов.

Глава 5 Моделирование потоков на вихревой ступени. На основе полученных данных численного моделирования и экспериментальных исследований изучена гидродинамика потоков газа и жидкости на ступени и газосодержание. Проведено исследование трех типов контактных устройств, схемы которых представлены на рисунке 8.

Увеличение угла наклона стенки канала приводит к снижению коэффициента сопротивления, который подчиняется зависимости $\xi = \alpha^{-0,71}$.

Характерные профили полной скорости газа на входе и выходе канала при изменении угла наклона представлены на рисунке 7. Согласно которым, уменьшение скорости газа приводит к росту толщины пристенного слоя и увеличению коэффициента сопротивления.

Как установлено результатами моделирования, с увеличением ширины канала величина коэффициента сопротивления завихрителя возрастает и подчиняется зависимости $\xi \sim b^{0,6}$.

В целом величина коэффициента сопротивления исследованных типов завихрителей в турбулентном режиме поддается расчету по уравнению:

$$\xi = A \cdot \alpha^{-0,71} \cdot Re^{-j} \cdot l_k^{0,19} \cdot b^{0,6} \cdot h^{-q}, \quad (5)$$

где $A = 10173$ – коэффициент для

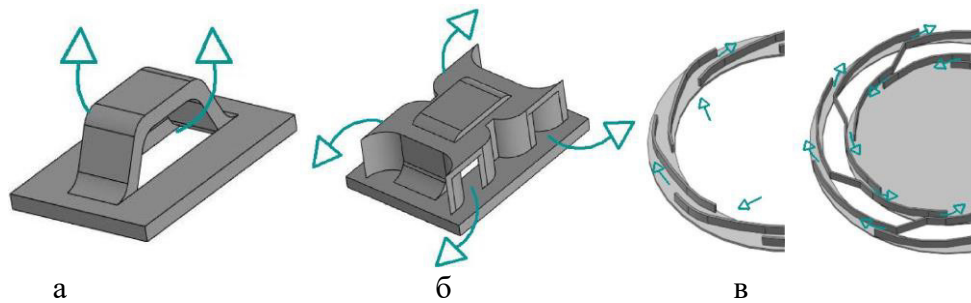


Рисунок 8 – Схемы контактных устройств: а) – фиксированный клапан; б) – клапанно-вихревое; (в – г) – вихревые

Распределение скорости жидкости на ступени с контактными устройствами представлено на рисунке 9.

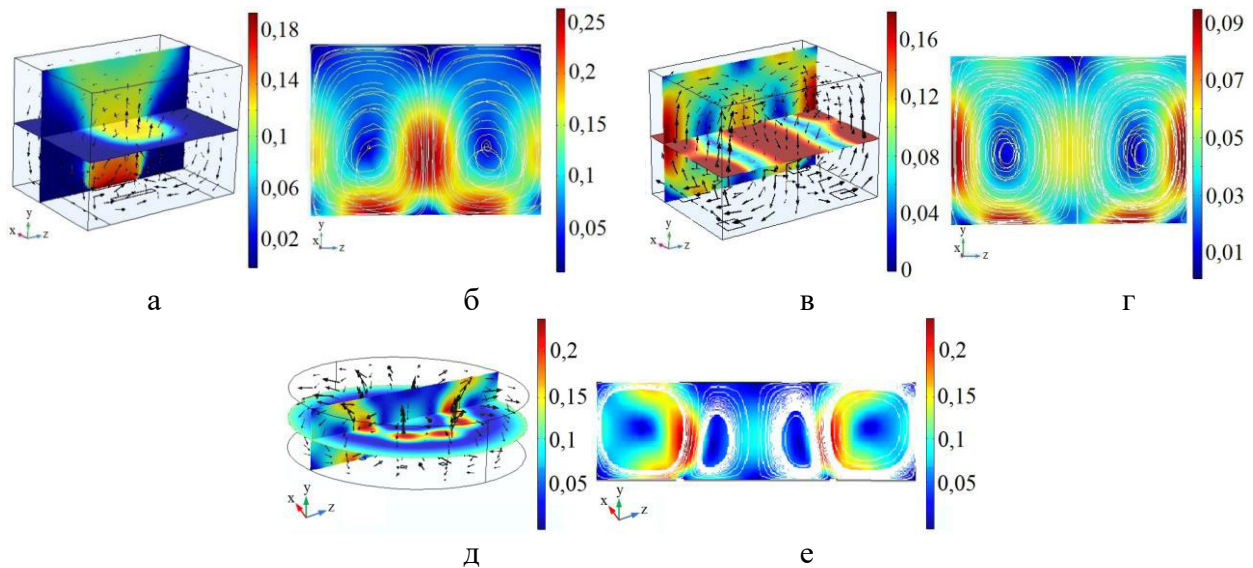


Рисунок 9 – Распределение полной скорости жидкости на клапанной (а – б), клапанно-вихревой (в – г) и вихревой (д – е) тарелках при удельном расходе газа 0,96 кг/(м²·с) и (г) 0,24 кг/(м²·с)

Анализ полученных данных позволил представить следующие взаимодействия потоков на ступени. Газ, выходящий из каналов устройства, внедряется в жидкость, а затем поднимается в виде струй и пузырьков в жидкости. За счет силы вязкого трения потоки газа увлекают прилегающие к ним слои жидкости, что вызывает на ступени циркуляционные контуры, направление движения которых зависит от конструкции устройства (см. рисунок 8). С увеличением расхода газа скорость циркуляции жидкости возрастает так же, как и диаметр увлекаемых пузырьков газа.

Расчетные профили скорости жидкости и газа в слое жидкости на ступени с разными контактными устройствами представлены на рисунке 10.

Структура и формирование профиля скорости жидкости и газа зависит как от места размещения каналов на тарелке, так и от расхода газа.

На тарелках клапанного и колпачкового типа вследствие достижения сравнительно низкого расхода газа, струи газа практически не дробятся в жидкости, что приводит к образованию крупнокапельной пены в верхних слоях жидкости на ступени. В нижних слоях жидкости формируются пузырьки газа

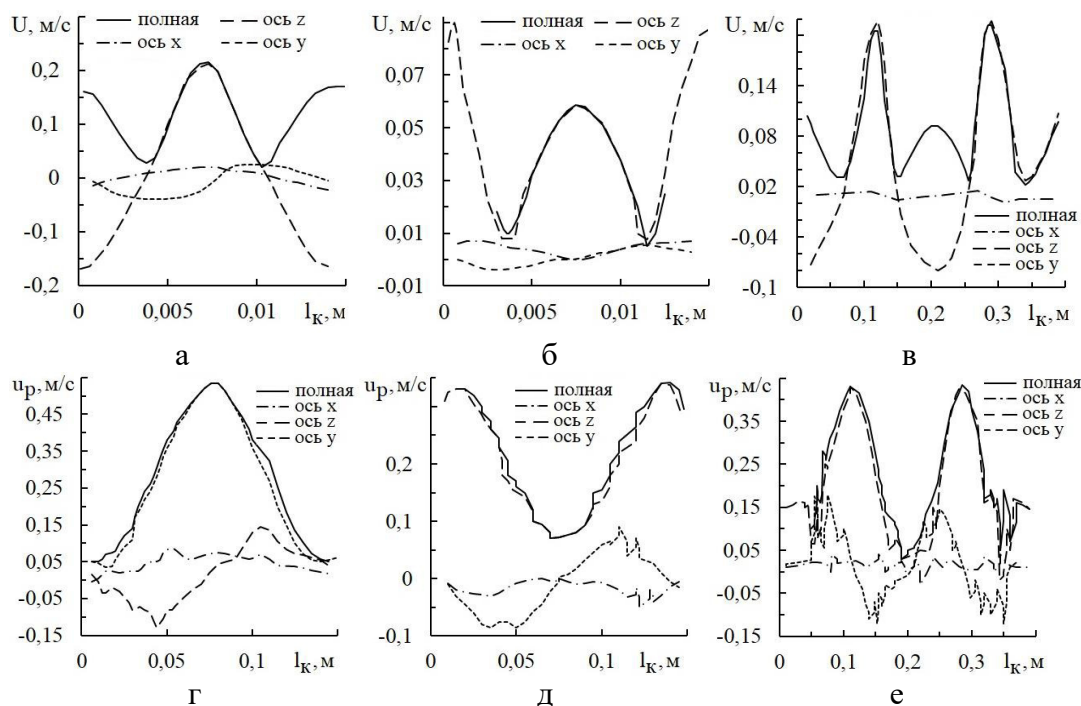


Рисунок 10 – Профили скорости жидкости (а – в) и газа (г – е), полученные на клапанной (а, г), клапанно-вихревой (б, д) и вихревой (в, е) тарелках

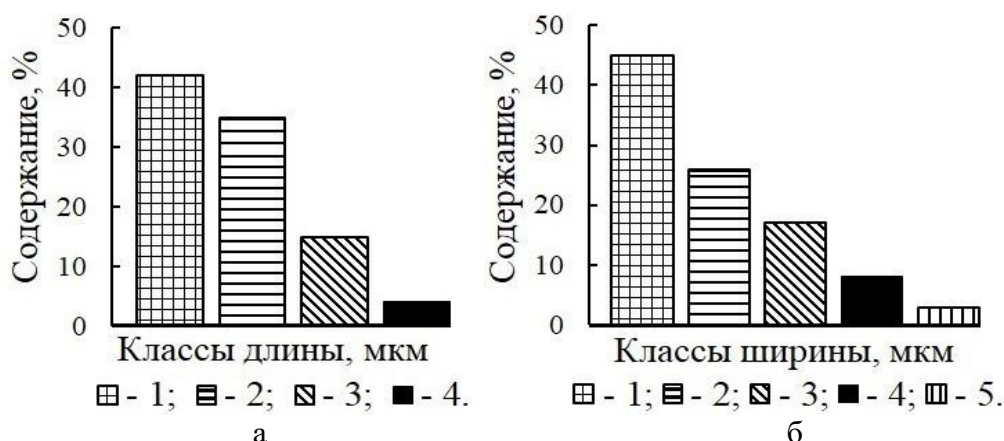
размером до 3 мм потоком циркулирующей жидкости. Газосодержание на таких ступенях зависит в основном от наличия циркуляции жидкости. На ступенях с вихревыми контактными устройствами за счет высокой скорости струй газа, выходящих из каналов завихрителя, обеспечивается дробление потока газа, с образованием пузырьков размером 4 – 8 мм по всему объему жидкости. Формирование межфазной поверхности на вихревой ступени определяется расходом газа, что и позволяет не только устранить колебания поверхностных слоев жидкости, но и увеличить нагрузки при сохранении эффективности тарелки.

Глава 6 Кинетика осаждения мелочи при физической коагуляции. На основании данных гидродинамики вращающегося потока разработан вихревой физический коагулятор, обеспечивающий укрупнение мелочи размолотой целлюлозы. Исследован механизм образования хлопьев из мелочи размолотой целлюлозы и их осаждение в суспензии, пропущенной через физический коагулятор. Параметры мелочи размолотой сульфатной беленой целлюлозы представлены на рисунке 11.

Фотографии мелочи, полученные при помощи микроскопа, показали, что волокна, прошедшие поры коагулятора, претерпевают изменения и имеют разветвленную структуру, в отличие от волокон, прошедших через сетку.

После физической коагуляции в объеме жидкости происходит перераспределение волокон, которые стремятся занять устойчивое положение, и образование хлопьев, размер которых зависит от концентрации волокон, таблица 1.

При концентрации мелочи в суспензии менее 0,023 – 0,03 г/л при отстаивании наблюдаются отдельные вкрапления частиц в жидкости. При концентрации 0,037 – 0,069 г/л в неподвижном объеме жидкости происходит образование одиночных хлопьев размером до 1 мм, распределенных по всему объему жидкости, скорость осаждения которых составляет $(0,63 - 0,89) \cdot 10^{-3}$ м/с.



(а) Длина волокна (1 – 4): 1 – 200 – 301 мкм, 2 – 301 – 454 мкм, 3 – 454 – 684 мкм, 4 – 684 – 1031 мкм; (б) Ширина волокна (1 – 5): 1 – 5 – 17 мкм, 2 – 17 – 27 мкм, 3 – 27 – 47 мкм, 4 – 47 – 67 мкм, 5 – более 67 мкм

Рисунок 11 – Распределение по классам средневзвешенной длины (а) и ширины (б) мелкой фракции суспензии от общего объема суспензии, полученной из хвойной беленой сульфатной целлюлозы при 58 °ШР и концентрации 3 %

При дальнейшем увеличении концентрации мелочи в суспензии наибольший размер отдельных хлопьев достигает 5 мм. При концентрации мелочи в суспензии более 0,3 г/л в объеме суспензии происходит образование волокнистой массы. Скорость осаждения хлопьев и волокнистой массы в суспензии представлена на рисунке 12.

Таблица 1 – Размеры хлопьев мелочи в суспензии после физической коагуляции в зависимости от концентрации волокон в суспензии

Размер, мм	Концентрация, г/л	
	хвойная целлюлоза	лиственная целлюлоза
Вкрапления	< 0,023	< 0,023 – 0,03
< 1	0,03 – 0,069	0,037 – 0,046
2 – 3	0,093 – 0,12	0,055 – 0,074
4 – 5	0,13 – 0,3	0,074 – 0,3
Волокнистая масса	> 0,3	> 0,3

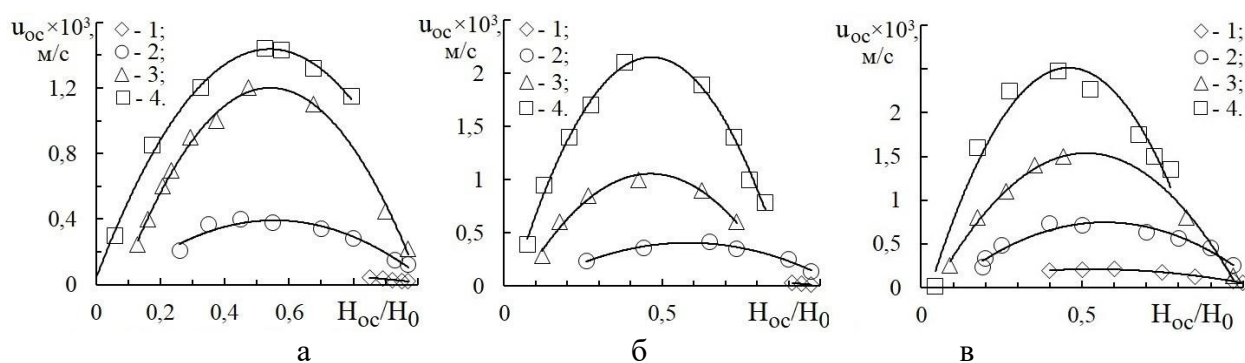
Скорость осаждения хлопьев размером 2 – 5 мм для целлюлозы и исследованной макулатуры (рисунок 13) составила $(1,0 – 2,5) \cdot 10^{-3}$ м/с и волокнистой массы $(0,2 – 0,8) \cdot 10^{-3}$ м/с, что на порядок выше скорости осаждения суспензии мелочи через сетку.

При времени осаждения 20 мин концентрация волокон в осветленной суспензии составила 0,018 – 0,023 г/л. Наименьшая концентрация в осветленной жидкости достигается

при опускании хлопьев мелочи из лиственной целлюлозы, которая имеет более сложную структуру в сравнении с хвойной целлюлозой. Уменьшение температуры суспензии с 22 до 14 °С не существенно влияет на скорость осаждения хлопьев.

Для обеспечения высокой скорости осаждения и, следовательно, наименьших габаритов отстойника с низкой концентрацией волокон в осветленной жидкости необходимо поддерживать концентрацию мелочи в суспензии 0,13 – 0,3 г/л, что позволяет обеспечить образование хлопьев после коагуляции размером до 5 мм.

Глава 7 Прикладная часть. На основании всесторонних исследований параметров вращающегося потока и кинетики осаждения проведено конструирование тарелки бражной колонны и установки для улавливания мелочи целлюлозы.



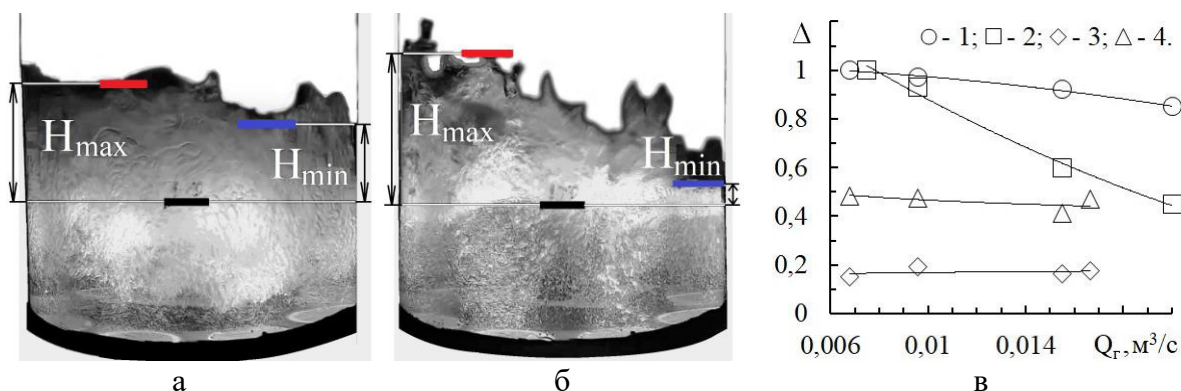
а) лиственная (1 – 4): 1 – концентрация раствора $c_p = 0,37$ г/л, 2 – 0,32; 3 – 0,2 г/л, 4 – 0,037 г/л; б) хвойная (1 – 4): 1 – $c_p = 0,7$ г/л, 2 – 0,4 г/л; 3 – 0,34 г/л, 4 – 0,19 г/л; в) макулатура (1 – 4): 1 – $c_p = 0,3$ г/л, 2 – 0,2 г/л; 3 – 0,1 г/л, 4 – 0,05 г/л

Рисунок 12 – Изменение скорости осаждения хлопьев и волокнистой массы в суспензии из размолотой беленой сульфатной лиственной (а) и хвойной (б) целлюлозы, и макулатуры (в) по высоте отстаивания

Для анализа работы вихревой тарелки исследовалась гидродинамика и массообмен на ступени с контактными элементами различной конструкции. Как установлено, на полотне тарелки при ее работе наблюдаются колебания газожидкостной среды, амплитуда которых зависит от конструкции контактного элемента. Наибольшая относительная амплитуда колебания наблюдается на ступени с фиксирующим клапаном (см. рисунок 13в, точки 1). Наименьшая амплитуда колебаний достигается при размещении вихревых устройств на ступени (см. рисунок 13в, точки 3 и 4), что обусловлено дроблением струй газа в жидкости с образованием пузырьков газа размером 4 – 8 мм по всему объему жидкости.

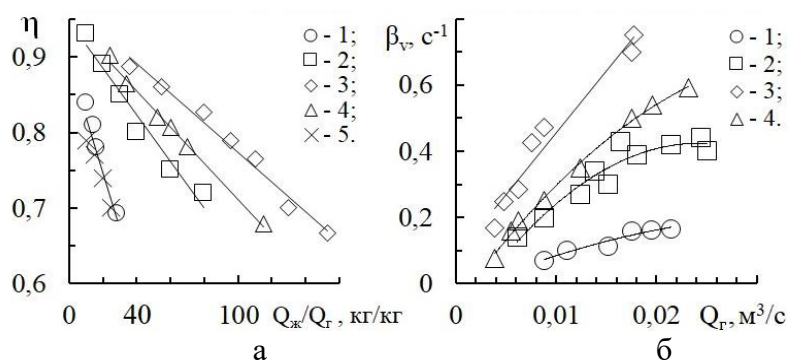
Эффективность ступени с различными контактными устройствами, и величина коэффициента массоотдачи представлены на рисунке 14.

При низких расходах жидкости, поступающей на тарелку, эффективность ступени имеет сравнительно большую величину и для всех исследуемых типов контактных устройств и составила 0,85 – 0,9. Однако с увеличением расхода жидкости эффективность колпачковой и клапанной тарелок резко уменьшается (рисунок 14а). Это обусловлено снижением газосодержания в слое жидкости на тарелке, вследствие вымывания пузырьков газа жидкостью, поступающей на тарелку.



Экспериментальные точки (1 – 4): 1 – клапанная тарелка; 2 – клапанно – вихревая тарелка; кольцевые каналы: 3, 4 – вихревые тарелки.

Рисунок 13 – Фотографии тарелок (а – б) и зависимость относительной амплитуды от расхода газа (в)



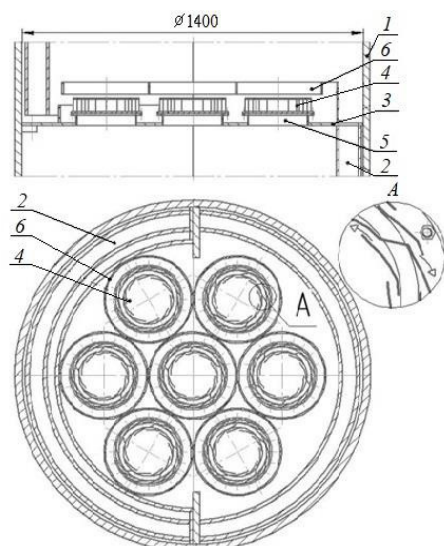
1 – клапанная тарелка, 2 – клапанно – вихревая, 3, 4 – вихревые; 5 – колпачковая

Рисунок 14 – Изменение эффективности тарелки от соотношения потоков (а) и величины коэффициента массоотдачи от расхода газа (б)

завихрителя в контактном устройстве – 15 шт., количество внутренних кольцевых каналов – 10 шт. При расходе пара 2,84 кг/с высота канала – 0,05 м, ширина канала – 0,01 м. При сравнении с промышленной бражной колпачковой колонной достигнуто снижение диаметра колонны в 1,8 раза, высоты колонны в 1,3 раза и металлоемкости ступени в 5 раз.

Установка для осаждения мелочи из суспензии с применением физического коагулятора представлена на рисунке 16.

Суспензия с мелочью поступает на поверхность вращающегося диска вихревого коагулятора, отбрасывается центробежной силой на пористую стенку коагулятора и приобретает вращательное движение, а затем проходит через пористую стенку фильтра и сливается в емкость 2. Затем суспензия поступает последовательно в один из отстойников 4. В отстойниках 4 поочередно происходит



1 – корпус; 2 – переток; 3 – перегородка; 4 – вихревые устройства; 5 – газовый патрубок; 6 – циркуляционные стаканы.

Рисунок 15 – Схема тарелки

На основании полученных данных проведены расчеты вихревой ступени бражной колонны при расходе бражки 80 $m^3/ч$ и концентрации этанола 3 % об.

Схема тарелки представлена на рисунке 15. Диаметр колонны составил 1,4 м, количество вихревых контактных устройств на ступени 7 шт.

Количество наружных кольцевых каналов

осаждение мелочи, отвод осадка осветленной жидкости и заполнение. Регулирование концентрации суспензии до заданной величины с целью получения хлопьев осуществляется путем подачи части осадка из сборника 6, в коагулятор 1 насосом 7. Конечный осадок поступает на обезвоживание, а осветленная суспензия идет на дальнейшую очистку.

Технологические данные для проектирования: средняя скорость осаждения в отстойнике составляет $(0,5 - 0,6) \cdot 10^{-3}$ м/с, удельная производительность по суспензии физического коагулятора 50 $m^3/m^2 \cdot ч$, концентрация мелочи в осветленной жидкости до 0,023 г/л.

Предлагаемый метод улавливания мелочи из целлюлозы позволяет исключить использование коагулянта, получить незагрязненные волокна, снизить металлоемкость установки.

Из мелочи путем гидролиза была получена микрокристаллическая целлюлоза со степенью полимеризации 106, что подтвердило целесообразность использования установки для улавливания волокон.

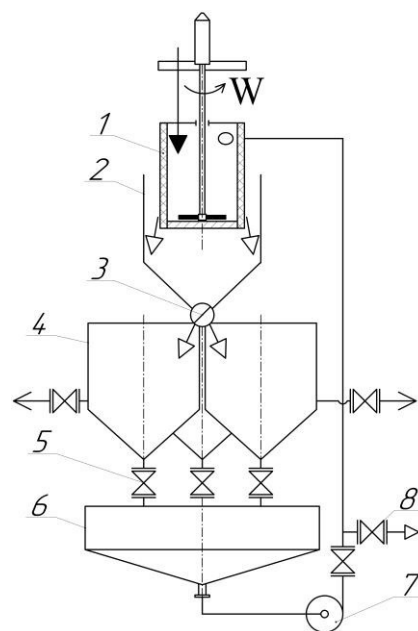
Выводы по диссертации

1. Получены зависимости для расчета гидродинамических и массообменных параметров вращающегося газо-жидкостного потока. Установлено, что с увеличением скорости газа в каналах завихрителя газосодержание в слое жидкости возрастает и становится наибольшим в барботажно-кольцевом режиме. На величину газосодержания оказывают влияние конструктивные параметры завихрителя, физические параметры среды и высота столба жидкости. Угловая скорость газо-жидкостного потока зависит от массы жидкости на ступени, скорости газа в каналах устройства и составила $11 - 17 \text{ с}^{-1}$. Величина межфазной поверхности на ступени с вихревыми устройствами – $600 - 1300 \text{ м}^{-1}$. Величина объемного коэффициента массоотдачи зависит от диссипации энергии газа и межфазной поверхности и равна $0,2 - 0,8 \text{ с}^{-1}$.

Поверхностный коэффициент массоотдачи при барботажно-кольцевом режиме составил $(0,5 - 0,8) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ и при кольцевом режиме – $(1 - 1,3) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$.

2. Разработаны новые конструкции тангенциальных завихрителей сопротивление которых в $1,8 - 3,0$ раза ниже, по сравнению с завихрителем с прямыми стенками каналов. Получена зависимость для расчета коэффициента гидравлического сопротивления. Наибольший вклад в общее сопротивление завихрителя вносят потери напора на входе в канал. Уменьшение угла наклона стенок канала завихрителя с 90° до 26° приводит к увеличению сопротивления за счет изменения входного профиля скорости. Увеличение высоты канала приводит к уменьшению сопротивления завихрителя за счет снижения влияния силы вязкого трения на профиль скорости. Значение коэффициента сопротивления возрастает с увеличением ширины канала для всех исследованных типов завихрителей, что обусловлено снижением скорости газа около стенки. Достигнута хорошая сопоставимость результатов численного моделирования и эксперимента, это позволяет сделать вывод о рациональности используемого метода расчета и примененных граничных условий.

3. Рассчитаны профили скорости и газосодержание в слое жидкости на тарелке при применении численного моделирования в Comsol Multiphysics, с использованием модели турбулентности $k-\epsilon$, совместно с моделью пузырькового



- 1 – физический коагулятор;
 2 – емкость; 3 – многоходовой кран; 4 – отстойники периодического действия;
 5 – вентили; 6 – сборник осадка;
 7 – насос; 8 – запорная арматура;
 ➔ – суспензия;
 ➔• – осветленная суспензия;
 ➔◐ – осадок.

Рисунок 16 – Схема установки для улавливания мелочи из суспензии

течения. Установлена величина начальной скорости газовой фазы, при которой достигается согласование экспериментальных и расчетных значений параметров потока. При обеспечении циркуляции жидкости на ступени со скоростью 0,5 м/с, достигается увлечение пузырьков газа в жидкость диаметром до 8 мм. Исследованы контактные ступени с вихревыми устройствами, позволившие снизить амплитуду колебания газо-жидкостной среды, увеличить эффективность, по сравнению с клапанной и колпачковой тарелкой. Представлена конструкция тарелки бражной колонны производительностью 80 м³/ч с разработанными вихревыми контактными устройствами.

4. Изучен размер мелочи в суспензии, выделенной из волокнистой массы хвойной и лиственной целлюлозы. Предложен вихревой физический коагулятор. Установлена концентрация коагулированной мелочи, равная 0,13 – 0,3 г/л, при которой происходит объединение мелочи в хлопья размером до 5 мм. Определены технологические параметры ведения процесса осаждения. Получена микрокристаллическая целлюлоза, со степенью полимеризации 106, которая может быть использована в качестве наполнителя. Разработана установка для осуществления улавливания мелочи из суспензии, при использовании которой уменьшается время осаждения хлопьев, снижаются нагрузки на сточные воды, а также сохраняется потребительская ценность волокон целлюлозы.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК

1. Вихревое контактное устройство для очистки газовых выбросов / Н. А. Войнов, О. П. Жукова, Н. Ю. Кожухова, А. В. Богаткова // Химия растительного сырья. – 2018. – №2. – С. 217-223. (автора 0,1 п.л.)
2. Интенсификация теплообмена в плёночном испарителе / Н. А. Войнов, О. П. Жукова, Н. Ю. Кожухова, А. В. Богаткова, Н. В. Дерягина // Хвойные Бореальной зоны. – 2018. – Т. XXXVI. – № 1. – С. 28–31. (автора 0,05 п.л.)
3. Вихревые ступени для тепломассообменных аппаратов / А. В. Богаткова, А. С. Фролов, Д. А. Земцов, О. П. Жукова, Н. А. Войнов // Химия растительного сырья. – 2020. – №1. – С. 347-354. (автора 0,11 п.л.)
4. Интенсификация теплообмена в diabатических ректификационных колоннах / Н. А. Войнов, Д. А. Земцов, А. В. Богаткова, Н. В. Дерягина // Химия растительного сырья. – 2020. – №4. – С. 511 -518. (автора 0,11 п.л.)
5. Сопротивление тангенциальных завихрителей с кольцевыми каналами / Н.А. Войнов, А.В. Богаткова, Н.В. Дерягина, Д.А. Земцов, Н.Ю. Кожухова // Химия растительного сырья. – 2022. – №1. – С. 335-342. (автора 0,1 п.л.)

Статьи в журналах, входящих в перечень Scopus и Web of Science

6. Hydraulic Resistance of Tangential Swirlers / N. A. Voinov, D. A. Zemtsov, O. P. Zhukova, A. V. Bogatkova // Chemical and Petroleum Engineering. – 2019. – V. 55. – Pp. 51-56. (автора 0,08 п.л.)
7. Hydrodynamics and Mass Transfer at the Vortex Stage and during Bubbling / N. A. Voinov, A. S. Frolov, A. V. Bogatkova, D. A. Zemtsov, O. P. Zhukova // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2019. – Vol. 53. – No. 6. (автора 0,1 п.л.)
8. Hydrodynamics of the vortex contact stage / N. V. Deryagina, N. A. Voinov, D. A. Zemtsov, A. V. Bogatkova // Thermal Science and Engineering Progress. – 2020. – V. 18.

(автора 0,125 п.л.)

9. Intensification of heat removal in diabatic columns / N. A. Voinov, N. V. Deryagina, D. A. Zemtsov, A. V. Bogatkova, O. P. Zhukova // APITECH II. IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1679. – 5 (25). – № 052080. (автора 0,1 п.л.)

10. Vortex Tray for Adiabatic and Nonadiabatic Fractionation / N. A. Voinov, D. A. Zemtsov, A. V. Bogatkova, N. V. Deryagina // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – 57. – Pp. 220–226. (автора 0,1 п.л.)

11. Resistance of Tangential Swirlers with Rectilinear Channel Walls / A. S. Frolov, N. A. Voinov, A. V. Bogatkova, D. A. Zemtsov, O. P. Zhukova // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 55. – No. 5. – Pp 914-922. (автора 0,1 п.л.)

12. Gas content of a liquid in threaded roughness recesses and its effect on heat and mass exchange / N. A. Voinov, D. A. Zemtsov, A. V. Bogatkova, N. V. Deryagina // CAMSTech-II 2021, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2021. – V. 1181. – №012032. (автора 0,1 п.л.)

13. Study of hydraulic resistance of tangential swirlers / N. A. Voinov, D. A. Zemtsov, A. V. Bogatkova, N. V. Deryagina // APITECH III. IOP Publishing. Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – 2094. – №052029. (автора 0,08 п.л.)

14. Voinov, N. A. Intensification of Heat and Mass Transfer in a Diabatic Column with Vortex Trays / N. A. Voinov, A. V. Bogatkova, D. A. Zemtsov // ChemEngineering. – 2022. – 6 (2). (автора 0,44 п.л.)

15. Sedimentation of Ground Cellulose Pulp Fines in the Suspension During Physical Coagulation / N. A. Voinov, A. V. Bogatkova, D. A. Zemtsov, A. Yu. Vititnev, R. A. Marchenko // BioResources. – 2022. – V. 17, No. 3. – Pp. 3883-3905. (автора 0,3 п.л.)

16. Experimental study and numerical simulation of hydrodynamic parameters of tangential swirlers / N. A. Voinov, A. S. Frolov, A. V. Bogatkova, D. A. Zemtsov // ChemEngineering. – 2022. – 6(4). (автора 0,25 п.л.)

Патенты

17. Пат. 2708361 Российская Федерация, МПКВ01D 3/30. Вихревая контактная ступень теплообменных аппаратов» / Н. А. Войнов, Д. А. Земцов, А. В. Богаткова ; заявитель и патентообладатель: Сибир. госуд. ун-т. науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева ; заявл. 26.12.2018; опуб. 5.12.2019, Бюл. №34. – 11 с. (автора 0,23 п.л.)

18. Пат. 2725931 Российская Федерация, МПКВ01D 3/24. Контактное устройство для теплообменных аппаратов» / Д. А. Земцов, Н. А. Войнов, А. В. Богаткова, О. П. Жукова; заявитель и патентообладатель: Сибир. госуд. ун-т. науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева ; заяв.: 10.12.2019; опуб. 07.07.2020 Бюл. 19. – 11 с. (автора 0,17 п.л.)

Подписано в печать 11.07.2022. Формат 60*84 1/16.

Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 3220.

Отпечатано в редакционно-издательском центре

СибГУ им. М.Ф. Решетнева

660049, г. Красноярск, просп. Мира, 82

Тел. (391) 222-73-28