

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Лаптева Анатолия Григорьевича на диссертационную работу

Богатковой Анастасии Викторовны на тему

**«Совершенствование контактных устройств на основе двухфазных
вращающихся потоков в технологиях переработки растительного**

сырья» представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 05.21.03 – «Технология и оборудование
химической переработки биомассы дерева; химия древесины»

Актуальность темы диссертационной работы

Модернизация и совершенствование контактных устройств в тепло- и массообменных аппаратах позволяет повысить эффективность проводимых процессов, снизить энергозатраты и металлоемкость оборудования. Известны сотни конструкций контактных устройств, среди которых особое место занимают вихревые.

Применение вращающихся потоков газа и жидкости обусловлено достижением существенной интенсификации переноса импульса, тепла и массы в устройствах различного назначения по сравнению с другими методами фазового взаимодействия.

Использование вращающихся потоков в скрубберах, ректификационных установках, экстракторах, сепараторах, испарителях, градильных, форсунках позволило достигнуть существенных успехов в различных отраслях промышленности. Внедрение вихревых устройств и аппаратов обеспечивает повышение технико-экономических показателей оборудования, позволяет наиболее полно удовлетворять требованиям технологии производства.

Важным конструктивным элементом представленных выше аппаратов является устройство (завихритель) обеспечивающее вращательное движения фаз.

Основными требованиями при разработке конструкции завихрителя является создание устройства с низким гидравлическим сопротивлением,

интенсивной круткой потока и большой пропускной способностью по жидкости или газу. Снижение сопротивления вихревых контактных устройств позволяет уменьшить затраты на транспортировку газа. Установка вихревых контактных устройств с низким сопротивлением на тарелках ректификационных колонн приводит к уменьшению затрат на потребления пара, позволяет путем варьирования конструктивными параметрами завихрителя поддерживается требуемый режим работы тарелок и обеспечить интенсивное дробление струй пара в жидкости, устранить флуктуации жидкости и застойные зоны. Применение вращающегося слоя суспензии размолотой целлюлозы на пористой поверхности фракционатора или физического коагулятора обеспечивает требуемую производительность и увеличивает продолжительность его непрерывной работы.

Внедрение вращающихся потоков, в аппаратах, используемых в технологиях переработки растительного сырья сдерживается отсутствием надежных зависимостей по расчету их параметров и конструированию устройств с учетом специфики рассматриваемого производства. Это позволяет утверждать, что применение закрученных потоков в инженерной практике перспективно, а работа над совершенствованием вихревых контактных устройств актуальна.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа объемом 119 страниц содержит 70 рисунков и 7 таблиц. Состоит из введения, семи глав, списка условных обозначений и библиографического списка из 123 наименований.

Во введении диссертации обсуждается актуальность темы исследования, представлена ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе сделан анализ конструкций тарелок, используемых в колоннах для ректификации бражки, полученной на основе гидролизатов древесины, показана целесообразность применения вихревых контактных устройств.

Представлен анализ устройств и способов, для улавливания мелкой фракции размолотой целлюлозы. Показано негативное влияние мелочи на технологические характеристики производства и выпускаемого продукта. Для устранения недостатков предположено использовать для укрупнения хлопьев волокон вихревой физический коагулятор. Также рассмотрены используемые на производствах вихревые контактные устройства. Утверждается, что наибольшее применение нашли завихрители тангенциального типа. Вследствие отсутствия достаточной информации по конструированию таких устройств, поставлена задача разработать завихрители с улучшенными характеристиками, выявить зависимости для расчета параметров вращающего потока.

Во второй главе (методическая часть) приведены схемы исследованных завихрителей, экспериментальных ступеней, указаны их конструктивные и технологические параметры. В качестве модельных и рабочих сред использовались воздух, водяной пар, вода, смесь этанол-вода, суспензия мелочи, полученная из лиственной, а также из хвойной размолотой сульфатной целлюлозы со степенью помола 30 – 70 °ШР и концентрацией волокна 3 – 20 %, макулатура.

В качестве пористой насадки физического коагулятора использовались цилиндрические фильтры: ЭФВП-СТ-100, а также фильтр марки Hengko, спрессованный из титановой крошки. Для изучения параметров мелочи использовался цифровой микроскоп Hitachi SU 3500, а также анализатор мелочи Morfi Neo. Для определения степени полимеризации целлюлозы использовался вискозиметрический метод. Для определения концентрации мелочи в суспензии использовался колориметр фотоэлектрический концентрационный.

Гидродинамика жидкости и газа на тарелке исследована с применением метод численного моделирования в программе Comsol Multiphysics, которая является интерактивной средой, основанной на методе контрольного объема.

При численном моделировании на первом этапе подготавливались твердотельные 3D модели исследуемых устройств. На втором этапе с помощью встроенных утилит геометрия была подвержена разбиению на элементы расчетной сетки. На третьем и последующих этапах проводился гидродинамический анализ.

В третьей главе приведены результаты гидравлических исследований контактных устройств с тангенциальными завихрителями на системе воздух-вода. Установлены режимы течения газо-жидкостной смеси на ступени, выявлена зависимость для определения критической скорости газа в каналах устройства, характеризующая переход из барботажного режима в кольцевой. Изучено газосодержание во вращающемся слое жидкости и выявлены конструктивные параметры ступени оказывающее влияние на ее величину. Установлены значения угловой скорости газо-жидкостного слоя, предложены эмпирические зависимости для ее расчета. Определена высота вращающегося газо-жидкостного слоя и установлено уравнение для ее расчета. Выявлен средне поверхностный диаметр пузырьков газа в жидкости, который в кольцевом режиме, составил 2 – 3 мм и установлена удельная площадь межфазной поверхности газо-жидкостного слоя, равная 600 – 1200 м⁻¹.

На примере абсорбции определены значения объемного и поверхностного коэффициента массоотдачи во вращающемся газо-жидкостном слое. Получено уравнение для их расчета с учетом межфазной поверхности и величины скорости диссипации энергии.

В четвертой главе представлены результаты измерения гидравлического сопротивления завихрителей различной конструкции в широком интервале варьирования конструктивных параметров и скорости газа, а также проведено их численное моделирование. Достигнута сопоставимость результатов численного моделирования и эксперимента, что позволило сделать вывод о рациональности используемого метода расчета и примененных граничных условий. Показано, что наименьшим

сопротивлением обладают тангенциальные завихрители с кольцевыми стенками каналов. Установлено, что наибольший вклад в общее сопротивление завихрителя вносят потери напора на входе в канал и в самом канале, которые зависят от профиля скорости на входе. Установлено влияние на сопротивление устройства угла наклона стенок канала завихрителя, его высоты и ширины, это позволило получить обобщающую эмпирическую зависимость для расчета величины коэффициента гидравлического сопротивления тангенциальных завихрителей.

В пятой главе даны результаты численного моделирования гидродинамики жидкости на тарелке, полученные методом конечных элементов с использованием моделей $k-\varepsilon$ турбулентности и пузырькового течения. Установлено наличие циркуляционного движения газо-жидкостной смеси на полотне тарелки. Определены профили скорости газа и жидкости. Установлена величина начальной скорости движения газовой фазы, при которой наблюдается согласование экспериментальных и расчетных значений. Показано влияние цилиндрической перегородки на профиль скорости жидкости и газосодержание, которая была установлена не каждое контактное устройство тарелки бражной колонны.

Представлены результаты исследования гидродинамики и массообмена на тарелках барботажного типа с клапанными, клапанно-вихревыми и вихревыми контактными устройствами. Путем экспериментальных исследований и численного моделирования определены поля скоростей жидкости и газа, а также структура газожидкостного слоя на тарелке.

Анализ полученных данных позволил описать взаимодействие потоков на тарелке. Показано, что на ступенях с вихревыми контактными устройствами за счет высокой скорости струй газа, обеспечивается дробление потока 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 в сравнении с

барботажными тарелками.

В шестой главе определен состав мелочи в суспензии, выделенной из волокнистых масс хвойной и лиственной целлюлозы. Установлена концентрация коагулированной мелочи, равная 0,13 – 0,3 г/л, при которой происходит объединение мелких волокон в хлопья размером до 5 мм. Определены технологические параметры ведения процесса отстаивания: средняя скорость осаждения с коагулированной мелочью в суспензии.

Получена микрокристаллическая целлюлоза химическим методом (гидролиз соляной кислотой), со степенью полимеризации 106, которую предполагается использовать в качестве наполнителя.

В седьмой главе установлена амплитуда колебания смеси на тарелке для разных типов контактных устройств, представлены экспериментальные данные величины коэффициента массоотдачи и эффективности. Показано, что наибольшей эффективностью, пропускной способностью по жидкости и газу обладают тарелки с вихревыми контактными устройствами, обладающие низкой амплитудой колебания среды и высокой межфазной поверхностью. Что обусловлено высокой диссипацией энергии газовых струй в жидкости, равномерным распределением пузырьков газа на тарелке, наличием вращательного движения среды на ступени.

Представлена конструкция вихревой тарелки промышленной бражной колонны, контактные устройства которой снабжены тангенциальными кольцевыми завихрителями. Проведено сравнение разработанной тарелки с промышленной колпачковой. Характерные показатели представлены в таблице.

На основании предложенного способа осаждения мелочи, заключающийся в возврате части осадка в суспензию поступающей в физический коагулятор. Разработана схема установки для осуществления улавливания мелочи из суспензии, использование которой позволит уменьшить на порядок времени осаждения хлопьев по сравнению с непрерывным отстаиванием, снизить капитальные затраты и получить целлюлозу для дальнейшего использования.

В заключении изложены основные научные результаты и выводы, полученные автором в результате экспериментальных исследований и численного моделирования процессов.

Степень разработанности темы исследования

Научные положения, выносимые на защиту, достаточно обоснованы и раскрыты в тексте диссертации, а также в опубликованных соискателем работах.

Научная новизна

Выполнены исследования и получены данные гидродинамических и кинетических параметров вращающегося слоя на контактной тарелке. Предложены эмпирические зависимости для расчета газосодержания, угловой скорости газо-жидкостного слоя и его высоты. Установлен средний поверхностный диаметр пузырьков газа в жидкости, площадь межфазной поверхности газо-жидкостного слоя и критическая скорость в каналах завихрителя для обеспечения вращательного движения на ступени. Получено выражение для расчета коэффициента массоотдачи, учитывающее наличие межфазной поверхности и диссипацию энергии газовой струи.

Впервые проведены комплексные экспериментальные исследования по изучению влияния на гидравлическое сопротивление конструктивных параметров тангенциальных завихрителей, результаты которых подтверждены данными численного моделирования. Получена обобщающая зависимость для расчета коэффициента гидравлического сопротивления тангенциальных завихрителей, учитывающая воздействие на потери напора ширины, длины, высоты, а также угла наклона стенок канала. Установлено, что наибольшее влияние на общий перепад давления тангенциальных завихрителей оказывают потеря напора на входе, величина которой зависит от формы профиля скорости газа.

На основании анализа экспериментальных данных и численного моделирования профилей скорости жидкости и газа установлен механизм образования газожидкостного слоя и его структура на тарелке с различными

контактными устройствами. Показана связь между размером газовых пузырьков в жидкости и скоростью циркуляционных потоков.

Представлены новые данные по структуре мелочи в суспензии размолотой целлюлозы, кинетические параметры осаждения хлопьев, полученных при пропускании суспензии через вихревой физический коагулятор. Установлена связь между размером хлопьев мелочи и ее концентрацией в суспензии, позволившая обосновать новый способ осаждения.

Теоретическая и практическая значимость работы

Проведенные исследования позволили добиться сходимости результатов численного моделирования и эксперимента и сделать вывод о рациональности используемого метода расчета и примененных граничных условий при конструировании устройств на практике.

Представленные в работе зависимости позволяют определять режимы течения газо-жидкостной смеси на тарелке, газосодержание, гидравлическое сопротивление, межфазную поверхность, величину коэффициента массоотдачи и эффективность. Это позволило разработать и запатентовать конструкции тангенциальных завихрителей с профилированными и кольцевыми стенками каналов, перепад давления которых при пропускании потока газа соответственно в 1,8 и 3 раза ниже в сравнении известными тангенциальными устройствами. Разработана конструкция тарелки бражной колонны с вихревыми контактными устройствами, позволяющие увеличить нагрузки по пару и жидкости, обеспечить высокую удельную межфазную поверхность до 1200 м^{-1} и коэффициент массоотдачи.

Результаты исследования структуры мелочи в суспензии размолотой целлюлозы, данные физического коагулирования, кинетики осаждения хлопьев, и характеристики вихревого коагулятора позволили разработать установку для улавливания мелочи.

Результаты совершенствования вихревых контактных устройств

подтвердили целесообразность разработки оборудования на их основе, позволяющие уменьшить габариты оборудования, его металлоемкость и увеличить энергоэффективность процессов.

Методология и методы диссертационного исследования

Для исследования гидродинамики вращающегося потока и массообмена, кинетики осаждения хлопьев мелочи использовались экспериментальные проверенные методы и методики.

Для математической и статистической обработки данных была использована программа Microsoft Excel.

Численное моделирование проводилось в программе Comsol Multiphysics, которая использует обобщенную версию уравнений Навье – Стокса, а также модель турбулентности $k-\epsilon$ и модель пузырькового течения.

Степень обоснованности научных положений.

Научные положения, выносимые на защиту обоснованы и раскрыты в тексте диссертации и в многочисленных опубликованных работах соискателем.

Степень достоверности и апробация работы

Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием современных средств измерения и методик проведения исследований.

Соответствие паспорту диссертации 05.21.03

Диссертационная работа Богатковой А. В. соответствует паспорту специальности 05.21.03 – «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины»: «17. Оборудование, машины, аппараты и системы автоматизации химической технологии биомассы дерева».

Рекомендации по использованию результатов

Полученные в диссертации результаты рекомендуется использовать в целлюлозно-бумажном производстве, например, для разработки систем

локальной очистки стоков производства. Разработанную тарелку с вихревыми контактными устройствами следует применять в ректификационных колоннах, установленных в технологиях лесохимической промышленности.

Замечания по диссертационной работе

1. Следует пояснить в чем заключаются недостатки осевых завихрителей при совершенствовании на их основе контактных ступеней?

2. В работе представлены данные, полученные при разных режимах взаимодействия фаз. Целесообразно представить рекомендации по их применению в промышленных установках.

3. Следовало бы увеличить геометрические параметры исследованных тангенциальных завихрителей, для их возможного использования в устройствах, предназначенных в системе очистки.

4. Пояснить физический смысл членов, входящих в расчет средней скорости диссипации энергии на стр. 31. Почему не используется гидравлическое сопротивление, полученное экспериментально.

5. Нет оценки погрешности экспериментальных исследований и доверительного интервала полученных формул.

Приведенные замечания не снижают положительную оценку научного уровня и практической ценности выполненной диссертационной работы, а имеют частный характер.

Заключение по работе

Актуальность темы диссертации, новизна и полученные результаты, позволяют заключить, что диссертация Богатковой А. В. «Совершенствование контактных устройств на основе двухфазных вращающихся потоков в технологиях переработки растительного сырья» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно-обоснованные технические и

технологические решения применительно к оборудованию используемого в технологиях переработки растительного сырья.

Диссертационная работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям п. 9 Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (ред. от 11.09.2021), а её автор, Богаткова Анастасия Викторовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.21.03 – Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины.

Официальный оппонент

Лаптев Анатолий Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Инженерной экологии»,
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
энергетический университет»



А. Г. Лаптев

23.08.2022

Шифр специальности, по которой
защищена докторская
диссертация Лаптева А.Г.

05.17.08 – Процессы и аппараты химической технологии.



Подпись официального оппонента заверяю

Рабочий адрес: 420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, 51

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», кафедра «Инженерной экологии»

Рабочий телефон: 8 (905) 020 85 33

Адрес электронной почты: tvt_kgeu@mail.ru ; grivka@mail.ru



Лаптева А.Г.

Подпись
Специалист УИ

А. А. Хабибрахманова