

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук Яблоковой Марины Александровны на диссертационную работу Анискина Сергея Васильевича «Теоретические основы моделирования и разработка струйных газопромывателей целлюлозного производства», представленную в диссертационный совет Д 212.236.08 на базе Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.21.03 – технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины.

Актуальность темы диссертационной работы

Разработка, исследование, оптимизация новых, более эффективных аппаратов очистки газовых выбросов в настоящее время актуальны не только для целлюлозно-бумажных производств, но и для многих других отраслей промышленности. В производстве целлюлозы и бумаги очень широко распространены процессы, протекающие в двухфазных системах газ-жидкость. Причем, значительная их часть протекает в условиях, когда газовая фаза является сплошной, а жидкая – дисперсной. Такие процессы, в частности, характерны для капельных аппаратов мокрой очистки газов от пыли, абсорберов и десорберов.

Скоростные газопромыватели на сегодняшний день признаны одними из самых эффективных аппаратов газоочистки. Однако их широкое внедрение в промышленность сдерживается отсутствием научно обоснованных методик расчета и проектирования. Исследованию аппаратов капельного типа посвящено огромное количество научных работ, однако большинство из них имеют узкий, чисто прикладной характер, изобилуют эмпирическими соотношениями, применимыми лишь для аппаратов конкретной конструкции и в узком диапазоне рабочих параметров.

Актуальность работы Анискина С.В. не вызывает сомнений, поскольку в настоящее время назрела насущная потребность в критическом анализе всех известных на сегодняшний день математических моделей гидродинамики и тепло-массопереноса в капельных газопромывателях с точки зрения их научной обоснованности, наилучшего соответствия экспериментальным результатам. Необходимо было выявить достоинства и недостатки существующих методов расчета этой группы аппаратов,

предложить новые, более точные подходы к их моделированию, расчету и проектированию.

В актуальности темы диссертационной работы убеждают также имеющиеся серьезные экологические проблемы на предприятиях целлюлозно-бумажной отрасли, связанные с недостаточной эффективностью очистки отходящих газов, как от твердых, так и газообразных примесей. Несмотря на появление нескольких типов высокоэффективных отечественных аппаратов скрубберного типа, совершенствование и внедрение оборудования для очистки газовых выбросов остается по-прежнему остается острой проблемой.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

О высокой степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, свидетельствует применение корректных теоретических предпосылок и допущений, использование фундаментальных уравнений гидродинамики и тепло-массопереноса, надежных математических методов решения поставленных задач, современных компьютерных технологий, большое количество экспериментальных исследований и внедрений.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность содержащихся в диссертации теоретических положений подтверждена многочисленными экспериментальными данными, совпадением их с результатами, полученными другими исследователями. Достоверность сделанных автором выводов и рекомендаций подтверждается проведением успешных испытаний и внедрением сразу нескольких газоочистных установок промышленного масштаба на различных предприятиях целлюлозно-бумажной отрасли.

Научная новизна диссертационной работы Анискина С.В. видится в следующем:

- разработаны и запатентованы новые, более эффективные и надежные модификации струйных газопромывателей, а также конструкции газоочистных аппаратов, сочетающие преимущества скрубберов и пенных газопромывателей;

- на основе фундаментальных уравнений гидродинамики, тепло- и массообмена разработано математическое описание движения в газовой фазе

полидисперсной системы струй и капель, а также математические модели процессов абсорбции, десорбции и улавливания пыли в струйных газопромывателях с центробежными форсунками;

- разработана математическая модель «концевого эффекта» - ускорения десорбции при дроблении струи на капли (ранее этот эффект был описан только качественно в работах Н.Н.Кулова);

- подтверждена возможность использования теоретических представлений о массообмене на отдельной капле при переходе к расчету аппаратов промышленного масштаба;

- показана возможность повышения эффективности очистки дымовых газов от сероводорода в режиме интенсивной конденсации паров воды в струйных газопромывателях.

Значимость полученных автором результатов для науки и практики

Полученные соискателем результаты вносят вклад в расширение и уточнение научных представлений о физико-химических механизмах процессов, протекающих в газожидкостных аппаратах с дисперсной жидкой фазой. Разработанные автором диссертации математические модели позволяют подойти к расчету скрубберов, капельных абсорберов и десорберов с научно обоснованных позиций.

Трудно переоценить практическую значимость диссертационной работы С.В. Анискина для повышения качества очистки газовых выбросов целлюлозно-бумажной промышленности. Им разработано и внедрено несколько новых высокоэффективных газоочистных аппаратов на Котласском, Архангельском, Соломбальском, Байкальском, Выборгском, Херсонском и Сегежском целлюлозно-бумажных комбинатах.

Личный вклад соискателя в разработку научной проблемы, репрезентативность эмпирического материала

Личным вкладом соискателя в разработку научной проблемы является постановка целей и задач исследования, разработка специальных методик, лабораторных стендов, проведение теоретических и экспериментальных исследований, решение краевых задач, разработка новых конструкций струйных газопромывателей, реконструкция старых скрубберов, проведение промышленных испытаний. Репрезентативность эмпирического материала подтверждена фотографиями, использованием стандартных методов обработки в среде MathLab, обсуждениями на конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

Оценка содержания диссертации, ее завершенности, подтверждение публикаций автора

Во введении подчеркнута актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, отражена научная и практическая значимость результатов работы.

Первая глава содержит аналитический обзор литературных и патентных источников, посвящённых аппаратурному оформлению газожидкостных процессов целлюлозного производства. Приведены сведения о газопылевых выбросах, разработке и применению струйных газопромывателей в различных технологических процессах ЦБП. В заключение главы сформулированы основные задачи, решение которых представлено в последующих главах.

Вторая глава содержит теоретические и экспериментальные исследования гидродинамики струйного газопромывателя (СПГ). Соискателем разработаны математические модели движения полидисперсного газожидкостного потока в струйном газопромывателе, которые условно названы: дискретная, непрерывная и модель подобия. Приведены результаты экспериментальных исследований дробления жидкой фазы центробежно-струйными форсунками. Предложены и обоснованы формулы для функций распределения скоростей капель и их размеров по сечению газожидкостной струи. Разработана модель движения плёнки жидкости, образующейся на стенках струйного газопромывателя, модель коагуляции капель, модель расчёта тягодутьевых параметров СПГ. Исследования нестационарных характеристик показали, что капельный поток придаёт устойчивость газовому потоку; раскрыт механизм турбулентного перемешивания газа внутри капельной струи.

Третья глава содержит исследования абсорбции и десорбции сероводорода каплями щелочных растворов, используемых в технологическом потоке производства целлюлозы. Поставлен и решён ряд краевых задач по хемосорбции сероводорода с разнообразными начальными и граничными условиями. Разработан метод расчета кинетики хемосорбции сероводорода каплями щелочного раствора с использованием аддитивной модели. Разработана конечно-разностная модель хемосорбции сероводорода в движущейся капле водного раствора гидроксида натрия с учётом изменения его концентрации на границе раздела фаз. Адекватность теоретических представлений была подтверждена на лабораторной установке с генератором монодисперсных капель. Установлено, что при высоких значениях рН раствора необходимо учитывать влияние сопротивления

границы раздела фаз на скорость абсорбции сероводорода. Обнаружено, что десорбция сероводорода происходит в основном во время образования капли. Показано, что этот эффект объясняется внутренним течением, возникающим при росте капли. Разработана модель процесса десорбции сероводорода при распаде на капли жидкостной струи, создаваемой центробежно-струйной форсункой.

Четвёртая глава содержит результаты исследования абсорбции газов, улавливания пыли и теплообмена в струйных газопромывателях при очистке газовых выбросов ЦБП. Соискателем проведено теоретическое исследование эффективности хемосорбции газовых примесей в зависимости от распределения жидкости по сечению аппарата. В результате исследования обнаружен так называемый «струйный» эффект, который позволяет существенно увеличить эффективность очистки газовых выбросов. Выбранное автором название для данного эффекта представляется неудачным, поскольку сразу же вызывает ассоциации с давно известным струйно-эжекционным эффектом в аппаратах с диспергированной струей жидкости. На самом деле повышение эффективности очистки при неравномерном орошении поперечного сечения аппарата связано с вихревым турбулентным переносом сорбируемого вещества вместе с газом в поперечном направлении от стенок к центру аппарата. Это позволяет более полно использовать высокую плотность орошения на оси аппарата для поглощения газовых примесей.

Автором разработано три модели абсорбции газовых примесей в СГП на основе фундаментального уравнения диффузии. Две модели подобны гидродинамическим – это дискретная и непрерывная модель, третья модель предполагает интенсивное перемешивание в поперечном сечении СГП. Разработана модель потока вещества на поверхности стекающей плёнки. Адекватность теоретических представлений об абсорбции газовых примесей и улавливании пыли подтверждена соискателем как собственными экспериментами, так и многочисленными экспериментами других авторов. Три модели теплообмена в СГП разработаны на основе фундаментального уравнения температуропроводности. По своей форме они полностью повторяют диффузионные модели. Принципиальная разница заключается в определении объёмного стока теплоты и вещества. Рассмотрено влияние теплообмена на абсорбцию газа и пыли. Наибольшее влияние происходит при наличии конденсации паров воды на каплях или частичках пыли. Этот эффект не нов, давно и хорошо известен в научно-технической литературе. Однако соискатель раскрывает новые грани пароконденсационного эффекта. Им проведено теоретическое исследование конденсации паров воды на

микронных частичках пыли сульфата натрия в насыщенной парогазовой смеси дымовых газов содорегенерационного котлоагрегата (СРК). Из расчётов следует, что за короткое время (0,1 секунды), сульфатная пылинка размером 1 мкм вырастает до 2 мкм. Это позволяет существенно увеличить эффективность инерционного улавливания остаточной пыли дымовых газов в струйных газопромывателях.

Пятая глава содержит сведения о практическом использовании результатов исследований промышленных струйных газопромывателей в промышленности. Масштабы внедрений впечатляют. Анискиным С.В. разработано и внедрено оборудование для очистки газовых выбросов в различных технологических процессах на Котласском, Архангельском, Соломбальском, Байкальском, Выборгском, Херсонском и Сегежском целлюлозно-бумажных комбинатах.

Организовано серийное производство нового, запатентованного С.В. Анискиным, комбинированного аппарата для очистки газовых выбросов, сочетающего преимущества струйного газопромывателя и пенного аппарата. Более двадцати таких аппаратов уже работают в промышленности.

Замечания

По диссертационной работе С.В. Анискина имеется ряд замечаний, в основном, дискуссионного характера, ни в коей мере не умаляющих больших достоинств его работы.

1. Почти в каждой главе соискатель разрабатывает для одного и того же физического процесса по две-три различных модели. Например, во второй главе приведены три различных математических модели движения полидисперсного газожидкостного потока в струйном газопромывателе, которые условно названы: дискретная, непрерывная и модель подобия. С одной стороны, возможность построить три различных физических модели для одного и того же аппарата, безусловно, говорит о научной эрудиции автора работы. Но с другой стороны у читателя возникают вопросы. Какая из этих моделей точнее описывает реальный процесс? Какую математическую модель должен выбрать расчетчик аппарата? Ответа в работе я не нашла.

2. В четвертой главе автором разработано три модели абсорбции газовых примесей в СГП на основе фундаментального уравнения диффузии. Две модели подобны гидродинамическим – это дискретная и непрерывная модель, третья модель предполагает интенсивное перемешивание в поперечном сечении СГП. Какая модель предпочтительнее – опять не ясно.

3. В той же четвертой главе соискатель рассмотрел три различных модели теплообмена в СПП, разработанные на основе уравнения температуропроводности. Может быть, определившись с моделями массопереноса, теплообменную модель можно было выбрать по аналогии?

4. Очень непривычно смотрятся граничные условия на стенках аппаратов, не предполагающие равенство нулю скорости на твердой поверхности. Понятно, что трение на стенках аппаратов практически не влияет на рассматриваемые процессы, но вид таких граничных условий настолько нарушает привычные каноны гидроаэродинамики, что мешает восприятию математических моделей.

5. Несколько смущает произвольный (на мой взгляд) выбор параметра объемного содержания жидкости $\beta = 0.01$, определяющего переход от фрагментарного к капельному течению в струйном газопромывателе.

Так же произвольно выбрано значение $\beta = 0.02$ для определения расстояния от сопла форсунки до сечения, в котором скорость газа принималась равной скорости капель.

6. Использование теоретических представлений о массообмене на отдельной капле для масштабного перехода к промышленным аппаратам больших размеров возможно является корректным, но для этого нужно было, как минимум, четко доказать, что капли жидкости во всем объеме аппарата движутся в свободном, а не стесненном режиме, то есть, доказать, что объемная доля жидкости в СПП нигде не превышает величину $\beta = 0,005$. Таких доказательств в работе найти не удалось.

7. Хотелось бы видеть в качестве итога работы не только математические модели, но и инженерные методики расчета газоочистных аппаратов, которые позволяли бы определять геометрические, гидродинамические и тепло-массообменные характеристики СПП широкому кругу их потребителей. Нужны методики, по которым аппарат мог бы рассчитать (хотя бы ориентировочно) не только автор данной диссертационной работы, но и технически грамотный инженер-проектировщик.

8. Диссертационная работа Анискина С.В. и ее автореферат не содержат списка условных обозначений величин, что затрудняет прочтение материала. И в диссертации и в автореферате имеются опечатки, неправильные ссылки на номера рисунков и уравнений. Некоторые расчетные схемы выглядят излишне упрощенными. Нетрудно заметить, что рисунки взяты автором из различных литературных и даже из Интернет-

источников, поэтому выглядят «разношерстными», в них нет единого стиля. Имеются ошибки в подписях к рисункам.

Заключение

Приведенные замечания являются дискуссионными, не снижают общий высокий уровень проведенных исследований и полученных результатов. Считаю, что представленная работа заслуживает положительной оценки. Диссертация Анискина Сергея Васильевича является завершённым исследованием, обладает научной новизной, практической значимостью.

Содержание автореферата и опубликованные труды с достаточной полнотой отражают основные положения диссертационной работы.

Диссертация Анискина Сергея Васильевича является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, изложены новые научно обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в решение актуальной проблемы целлюлозно-бумажной промышленности – совершенствования технологического оборудования для систем газ-жидкость с целью снижения газопылевых выбросов в атмосферу, соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым ВАК Министерства образования и науки РФ к докторским диссертациям, а её автор Анискин Сергей Васильевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.21.03 – «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины».

Официальный оппонент,
доктор технических наук, специальность 05.17.08,
профессор, зав. кафедрой инженерного проектирования
Санкт-Петербургского государственного технологического института
(технического университета)
190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 26
E-mail: kip@technolog.edu.ru

М.А.Яблокова

08.12.17

Подпись руки М.А.Яблоковой заверяю

начальник



8

Проф. Г.Ю. Прохорова