

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента **Меренцова Николая Анатольевича**  
на диссертационную работу **Аласгарли Сеймура Ульви оглы**  
**«ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОВМЕСТНЫХ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННЫХ**  
**ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА И РАЗДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ**  
**В НАСАДОЧНЫХ И БАРБОТАЖНЫХ СКРУББЕРАХ»,**  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности

2.4.6. – «Теоретическая и прикладная теплотехника»

### **Актуальность темы:**

Актуальность представленного исследования определяется потребностью промышленности и энергетических компаний в надежных и энергоэффективных технологиях охлаждения и очистки газовых потоков. В современных условиях существенно возрастает значение аппаратов, работающих на принципах прямого контакта фаз, поскольку именно такие системы позволяют одновременно обеспечивать снижение температуры газов и удаление дисперсных примесей. Практика эксплуатации действующих скрубберов показывает, что эффективность их работы в значительной степени определяется конструкцией насадочного слоя и характером взаимодействия водяной плёнки с газовым потоком. В существующих аппаратах нередко наблюдается неравномерность распределения фаз, приводящая к снижению интенсивности теплообмена и увеличению потерь давления. Это делает актуальными научные исследования, направленные на оценку гидродинамических и теплообменных характеристик различных типов насадок, включая комбинированные укладки, а также на разработку математических моделей, позволяющих учитывать реальные неоднородности структуры потока.

В этой связи рассмотренная в диссертации задача повышения эффективности тепло- и массообмена в насадочных и барботажных скрубберах является значимой как для развития теоретических основ инженерной теплофизики, так и для совершенствования промышленного оборудования, применяемого в энергетике, химической и нефтехимической отраслях.

**Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника» по следующим направлениям:**

- Процессы взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом; совместный перенос массы, импульса и энергии в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси;
- Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках.

По формуле специальности: научная дисциплина, ориентированная на совершенствование аппаратного оформления технологических процессов с позиций энерго- и ресурсосбережения.

**Научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований.** В диссертации Аласгарли С.У. представлены результаты, обладающие научной новизной и имеющие практическую значимость:

1. Получен расширенный комплекс экспериментальных данных по перепаду давления, объёмным коэффициентам массоотдачи и эффективности массообмена в колонне, оснащённой регулярной полимерной сетчатой насадкой и комбинированным расположением с нерегулярной металлической насадкой. Исследования проведены в широком диапазоне скоростей газа (0,5–2,6 м/с) и плотностей орошения (4,9–15,9 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч)). На основании экспериментов выполнено обобщение гидравлических и массообменных характеристик и получены новые эмпирические зависимости. Для нерегулярной насадки предложена модифицированная форма метода единиц переноса, что позволило вывести аналитическое выражение для оценки требуемой высоты насадочного слоя с учётом реальной структуры межфазного контакта.

2. В рамках диссертационного исследования разработана математическая модель, основанная на системе уравнений в частных производных, описывающей совместные процессы тепломассообмена и переноса аэрозольных частиц с учётом локальных межфазных источников и параметров турбулентного обмена. Численное решение данной системы позволило получить распределения энтальпии и температуры газовой фазы, влажности и температуры жидкости, а также концентраций дисперсной фазы

по высоте насадочного слоя. На основе расчётов установлено, что поперечная неоднородность газового потока способна снижать результирующую эффективность теплообмена и сепарации аэрозолей вплоть до 30 %, что подтверждает важность учёта реальных распределений скоростей при проектировании подобных аппаратов.

3. Сформирована и обоснована система расчётных уравнений для определения тепловой эффективности и конструктивных параметров ситчатых, клапанных и струйных тарелок в условиях одновременного охлаждения газового потока жидкостью и выделения аэрозольной фазы. При выводе выражений использованы модель идеального вытеснения для газовой фазы и ячеечное представление течения жидкости, позволяющее корректно учитывать особенности структуры потока в тарельчатых устройствах. Показано, что изменения гидродинамики жидкой фазы напрямую отражаются на величине тепловой эффективности.

**Обоснованность и достоверность полученных результатов** подтверждается применением проверенных методик измерения гидродинамических и тепломассообменных характеристик, а также согласованием расчётных данных с результатами прямых экспериментов и опубликованными сведениями других исследователей. Дополнительным подтверждением достоверности служат итоги внедрения и промышленной эксплуатации модернизированного скруббера на установке охлаждения и очистки пирогаза, где полученные автором решения продемонстрировали соответствие реальным режимам работы аппарата по техническому заданию.

Материалы диссертационной работы неоднократно представлялись на научных конференциях и тематических семинарах, что обеспечило их апробацию. На разработанную комбинированную конструкцию скруббера оформлен патент, что также свидетельствует о практической значимости проведённых исследований.

### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа Аласгарли С.У. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений.

**Во введении** обоснована актуальность исследования, связанная с необходимостью повышения эффективности процессов охлаждения и очистки газовых сред в промышленных скрубберах. Сформулированы цель и

задачи работы, определены методы исследования и приведено краткое описание структуры диссертации.

**Первая глава** содержит развернутый анализ существующих подходов к расчёту и проектированию аппаратов, применяемых для процессов охлаждения и очистки газовых сред. Рассмотрены основные принципы тепломассообмена при взаимодействии фаз и приведены конструктивные решения промышленных скрубберов, включая насадочные, барботажные и комбинированные варианты. Дана характеристика различных типов контактных устройств, их функциональных особенностей и ограничений при эксплуатации.

**Вторая глава** посвящена экспериментальному исследованию процессов гидродинамики и массообмена на установке в колонне, работающей в режиме охлаждения и увлажнения воздуха. Представлены результаты измерений перепада давления, коэффициентов массоотдачи и эффективности массообмена для колонны с регулярной рулонной насадкой, а также для комбинированного слоя, включающего регулярные и хаотичные элементы. Установлены закономерности влияния скорости газового потока и плотности орошения на гидравлические характеристики и эффективность массообмена. Приведены обобщённые зависимости и выполнено сравнение исследуемых контактных устройств с данными различных авторов.

**В третьей главе** представлено развитие теоретической части исследования: сформированы и проверены математические модели, описывающие процессы тепломассообмена и перенос дисперсной фазы в насадочных скрубберах. Основное внимание уделено методам численного решения, позволяющим учесть неоднородность параметров газожидкостного потока. Глава опирается на результаты экспериментов предыдущего раздела и направлена на получение обобщённых зависимостей, пригодных для инженерных расчётов.

**Четвёртая глава** посвящена построению комплексной модели процессов теплопередачи, массообмена и конденсационной очистки аэрозолей в аппаратах тарельчатого типа. Рассматриваются режимы работы барботажно-струйных контактных устройств, анализируется влияние турбулентности и локальных межфазных источников на эффективность аппарата. Глава развивает методологию и формирует теоретическую основу для дальнейшей оптимизации контактных устройств в промышленности.

**Пятая глава** носит прикладной характер и демонстрирует практическое применение полученных в работе результатов. Рассмотрен пример модернизации промышленного скруббера К-5, используемого в технологической цепочке охлаждения и очистки пирогаза. Приведены данные испытаний обновлённой конструкции на производственной площадке, подтверждающие соответствие расчётных характеристик требованиям технического задания и достижение требуемых параметров по охлаждению и очистке газового потока на заводе «Этилен».

В целом диссертация **Аласгарли С. У.** представляет собой завершённое и выверенное исследование, в рамках которого решён широкий круг задач, связанных с повышением эффективности тепломассообменных и разделения аэрозольных систем в контактных аппаратах насадочного и барботажного типов. Работа отличается последовательностью изложения, согласованностью теоретических и экспериментальных частей и устойчивой логикой построения, что позволяет убедительно обосновать полученные зависимости и расчётные методики. Результаты исследования могут быть практически применены при проектировании, оптимизации и модернизации оборудования, предназначенного для охлаждения и очистки технологических газов.

Полученные выводы и разработанные методы могут использоваться при создании и обновлении газоочистных и теплообменных систем, в которых реализуются комбинированные процессы переноса тепла, массы и разделения дисперсной фазы.

#### **Рекомендации по использованию научно-технических результатов и выводов диссертации.**

Полученные автором зависимости и обобщённые экспериментальные данные позволяют уточнять расчётные методики проектирования насадочных и барботажных скрубберов, выбирать оптимальные геометрические и режимные параметры для повышения их эффективности. Численное моделирование и предложенные эмпирические выражения могут служить основой для инженерных расчётов и компьютерного моделирования аппаратов контактного типа газ-жидкость.

### **Вопросы, замечания и предложения по работе:**

1. Что оказывает более существенное влияние на высоту насадочного слоя в развитых гидрогазодинамических режимах? Обратное перемешивание (Модифицированные числа Пекле  $Pe$ ) в жидкой или газовой фазе теплоносителей?

2. Возможно ли учесть дисбаланс полей локальных скоростей потока газофазного теплоносителя по высоте насадочного блока для более отчетливой гидродинамической картины и учета неравномерностей распределения фаз в модифицированных моделях, разработанных автором?

3. В чем ключевые преимущества использованных комбинированных насадочных блоков (хаотичной и регулярной) по сравнению с типовыми? Проводились ли экспериментальные исследования с вариативностью высоты нижнего распределительного (стабилизирующего) слоя?

4. По скольким параллельным опытам проводилось усреднение и корреляционный анализ экспериментальных данных (как гидродинамических, так и массообменных характеристик)?

5. Соответствуют ли реальным гидрогазодинамическим условиям взаимодействия газо- и жидкофазного теплоносителей допущения, сделанные автором при составлении математических моделей? Для каких режимов работы аппаратов они могут быть справедливы (развитых гидродинамических режимов эмульгирования (за точкой инверсии фаз), турбулентном или пленочном (до точки инверсии))?

6. Какие ключевые преимущества дает разработанная (модернизированная) конструкция промышленного насадочного скруббера К-5, внедренного для очистки и охлаждения пирогаза?

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования Аласгарли С.У.

### **Заключение**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 научных работах, 4 из них из списка рекомендованного ВАК и 2 - входящих в базу Scopus. Также результаты исследования прошли апробацию на научных конференциях и семинарах. Автореферат и научные статьи, опубликованные автором, достаточно полно отражают основное содержание

диссертации, характеризуют результаты выполненных экспериментальных исследований.

Уровень решаемых задач соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника».

Диссертационная работа Аласгарли Сеймура Ульви оглы «Эффективность совместных интенсифицированных процессов тепломассообмена и разделения аэрозолей в насадочных и барботажных скрубберах» представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование. В работе решена комплексная задача математического моделирования, экспериментального анализа и повышения эффективности тепломассообмена в скрубберах с внедрением в промышленности. Диссертация по критериям актуальности, научной новизны, практической значимости, обоснованности и достоверности выводов соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрауки России, установленным в пп.9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней (Постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 в редакции от 18.03.2023), а соискатель Аласгарли Сеймур Ульви оглы несомненно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника».

#### Официальный оппонент

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств Волгоградского государственного технического университета Меренцов Николай Анатольевич, 8-917-837-67-38

Ученая степень: кандидат технических наук по специальности 05.23.04 – «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов»

Н.А. Меренцов

400005, г. Волгоград, пр.Ленина, 28.

тел. (8442) 23-00-76, e-mail: [rector@vstn.ru](mailto:rector@vstn.ru),

тел (8442) 24-84-40, e-mail: [pahp@vstn.ru](mailto:pahp@vstn.ru)

