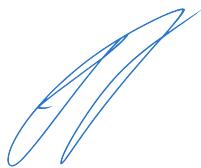


*На правах рукописи*



**Аласгарли Сеймур Ульви оглы**

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОВМЕСТНЫХ  
ИНТЕНСИФИЦИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ  
ТЕПЛОМАССООБМЕНА И РАЗДЕЛЕНИЯ  
АЭРОЗОЛЕЙ В НАСАДОЧНЫХ И БАРБОТАЖНЫХ  
СКРУББЕРАХ**

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Казань - 2025**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

**Научный руководитель –** доктор технических наук, профессор  
**Лаптев Анатолий Григорьевич**

**Официальные оппоненты:** **Гаряев Андрей Борисович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Тепломассообменные процессы и установки» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва;  
**Меренцов Николай Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград

**Ведущая организация –** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Защита диссертации состоится «23» декабря 2025 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.310.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224, тел.: (843)519-42-58.

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просьба направлять по адресу: 420066, Республика Татарстан, ул. Красносельская, д. 51, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.03, Svetlana-zag@bk.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на сайте <https://kgeu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» 2025 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Борисова Светлана Дмитриевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования:** на предприятиях промышленной химии, нефтехимии, нефтегазопереработки и на тепловых станциях применяются процессы охлаждения газов при непосредственном контакте с водой в экономайзерах и скрубберах. Причём во многих случаях процесс охлаждения протекает совместно с очисткой от различного вида дисперсной фазы, так называемая «мокрая» очистка. В связи с развитием направления на технологический суперенитет актуальным является проведение фундаментальных и прикладных исследований тепломассообмена и разделения аэрозольных систем в скрубберах различных конструкций, к которым относятся насадочные и барботажные аппараты. При непосредственном контакте фаз эффективность процессов значительно выше, чем через разделяющую стенку, но при экспериментальных исследованиях и математическом моделировании появляются дополнительные сложности с учётом термодинамических и кинетических характеристик влажных газов (как технологических, так и дымовых), подвижной межфазной поверхности и весьма приближенно известной площади контакта фаз. Кроме этого, дополнительные трудности возникают при неоднородном распределении газа и жидкости в рабочем объеме аппарата, что как известно снижает эффективность тепло- и массообмена. Поэтому актуальной задачей является физическое и математическое моделирование с учётом отличительных особенностей процессов охлаждения газов совместно с разделением аэрозольных систем в промышленных скрубберах при интенсивных режимах взаимодействия фаз.

Работа выполнена в рамках научного проекта РНФ 25-29-00129 «Энергопрессурсоэффективность широкого класса процессов и технологическая независимость промышленных аппаратов на предприятиях топливноэнергетического комплекса» (2025–2026 гг.).

**Степень проработанности проблемы.** В теоретические основы физического и математического моделирования тепломассообменных и сепарационных процессов особый вклад внесли Кафаров В.В., Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И., Ягов В. В., Алексеенко С.В., Розен А.М., Левич В. Г., Холпанов Л.П., Войнов Н.А., Медников В.П и другие. Исследованием тепломассообменных процессов в аппаратах, разработкой методов их расчёта и совершенствованием конструкций контактных устройств также занимались Аронов И.З., А.К. Чернышев, Пономаренко В.С., Д.А. Баранов, М.Г. Беренгартен, Р.Ф. Витковская, А.С. Пушнов, А.Б. Голованчиков, М.И. Фарахов, Н.Б. Ульянов, А.В. Дмитриев, А.Г. Лаптев, А.Н. Николаев, А.В. Дубовик, В.И. Поляков, К.В. Покрышкин, V.K. Pathak, K.A. Alekseev, S.M. Kirichenko и многие другие. Однако на сегодняшний день недостаточно полно разработаны математические модели с учётом неравномерности распределения фаз, обратного перемешивания теплоносителей, а также конструкции скрубберов с отечественными высокоэффективными насадками и барботажными тарелками.

**Цель исследования:** комплексное повышение эффективности совместных процессов охлаждения и очистки газовых сред от дисперсной фазы в скрубберах с барботажными тарелками и контактными насадками на основе физического и математического моделирования взаимодействия фаз с применением импортозамещающих насадок.

### **Задачи исследования**

1. Получить и обобщить экспериментальные данные по гидравлическим и тепломассообменным характеристикам противоточного пленочного взаимодействия газа и жидкости в скруббере с регулярной и комбинированными контактными устройствами (насадками).

2. Разработать математическую модель охлаждения газа и разделения аэрозольных систем в насадочном скруббере с нерегулярной насадкой с учетом неоднородного распределения газового потока и обратного перемешивания теплоносителей. Выполнить численное исследование эффективности тепломассообмена конденсационного охлаждения газа при контакте с жидкой фазой, а также разделение аэрозольных систем в хаотичном насадочном слое.

3. Разработать математическую модель тепломассообмена охлаждения газа и разделения аэрозолей на ситчатых и струйных тарелках для вычисления эффективности процессов.

4. Разработать научно-технические решения по повышению эффективности охлаждения пирогаза совместно с разделением аэрозолей в промышленном скруббере в производстве этилена.

### **Научная новизна**

1. Получены экспериментальные данные по перепаду давления, объемным коэффициентом массоотдачи и эффективности массообмена при увлажнении воздуха водой в колонне с регулярной сетчатой полимерной насадкой, а также при комбинированном расположении с нерегулярной металлической при скорости воздуха от 0,5 до 2,6 м/с и плотности орошения от 4,9 до 15,9 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>ч). Исследованные гидравлические и массообменные характеристики обобщены в виде эмпирических выражений. Для исследований насадки выполнена модификация метода единиц переноса и получено выражение для расчета высоты насадочного слоя с учетом гидродинамической структуры потока газа и жидкости.

2. На основе применены системы дифференциальных уравнений в частных производных представлена математическая модель, где учёт тепломассообмена и сепарации аэрозолей учитывается локальными межфазными источниками и коэффициентами турбулентного обмена. В результате численного решения системы уравнений получены профили энтальпии газа, температуры жидкости, влагосодержания и концентрации аэрозольных частиц в объёме хаотичной насадки и вычислены эффективности процессов. Установлено, что поперечная неравномерность профиля скорости газа вызывает снижение эффективности процессов до 30% относительных.

3. Получена система уравнений для расчёта тепловой эффективности и конструктивных характеристик ситчатой, клапанной и струйной тарелок при совместных процессах охлаждения газа жидкой фазой и сепарация аэрозолей. Использована модель идеального вытеснения газа и ячеичная модель гидродинамической структуры жидкой фазы. Показано влияние структуры потока жидкой фазы на тепловую эффективность.

**Объекты исследования:** тепломассообмен и разделение аэрозольных систем в насадочных и барботажных скрубберах охлаждения и очистки газов при непосредственном контакте с водой.

### **Теоретическая и практическая значимость**

1. Получены эмпирические выражения для расчёта гидравлического сопротивления орошаемой рулонной насадки из полимерной сетки при скорости воздуха от 0,5 до 2,5 м/с и плотности орошения водой от 4,9 до 15,9 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>ч).

2. Получено выражение для расчёта объёмного коэффициента массоотдачи при моделировании эффективности процессов тепломассообмена.

3. Представлены математические модели тепломассообмена и сепарации аэрозолей для расчёта эффективности процессов при противотоке плёнки воды с газом в нерегулярных и регулярных насадках, которые позволяют вычислить физические поля с учётом неоднородности распределения фаз.

4. Разработан инженерный метод расчёта тепловой эффективности насадочных и тарельчатых скрубберов, а также их конструктивных и режимных характеристик.

5. Разработаны научно-технические решения по модернизации промышленного скруббера охлаждения и очистки пирогаза водой, внедренные на заводе «Этилен».

6. Предложенные научные подходы используются при выполнении фундаментальных и прикладных научных исследований в области тепломассообменных процессов сотрудниками ИММ КазНЦ РАН, ООО ИВЦ «Инжехим», а также в учебном процессе.

### **Методы исследования поставленных задач**

Заключаются в планировании и проведении экспериментальных исследований, обработки и обобщении полученных данных, а также в применении системы дифференциальных уравнений и моделей гидродинамической структуры потоков для определения тепловой и сепарационной эффективности процессов в скрубберах.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается поверенными средствами измерения характеристик исследованных процессов, согласованием расчётных значений с полученными экспериментальными данными и данными других исследователей. Успешным

внедрением модернизированного скруббера в производстве этилена.

**Положения, выносимые на защиту**, заключаются в:

1. Разработанной математической модели тепломассообмена и сепарации аэрозолей в насадочном скруббере с учетом неоднородности профиля скорости газа.
2. Результатах экспериментальных исследований гидравлических и массообменных характеристик в колонне с регулярной и комбинированной насадками. Обобщение опытных данных в виде расчетных выражений;
3. Разработанном алгоритме расчета эффективности сепарации аэрозольных систем в прямоточном насадочном скруббере.
4. Модернизации промышленного скруббера охлаждения и очистки пирогаза.

**Апробация работы и публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 13 работ, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus, 3 – в научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации. Получен патент. Отдельные разделы диссертации докладывались и обсуждались на Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ), г. Казань, 2023, III Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», г. Казань, 2022, IV Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», г. Казань, 2023, а также на семинарах и конференциях КГЭУ (2021-2025 гг.).

**Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника»** по пунктам паспорта:

3 – «Процессы взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом; совместный перенос массы, импульса и энергии в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси»; 5 – «Научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты. Процессы тепло- и массообмена в оборудовании, предназначенном для производства, преобразования, передачи и потребления теплоты»; 6 – «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках.»

**Личный вклад соискателя** состоит в непосредственном участии во всех этапах получения результатов, представленных в диссертации, в разработке математической модели, позволяющей учесть неравномерность распределения фаз, в самостоятельном проведении экспериментов на экспериментальной установке, обработке результатов эксперимента в виде расчетных эмпирических выражений, в разработке научно-технических решений, направленных на повышение эффективности тепломассообмена, подготовке докладов, выступлений на конференциях и написании статей.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений и содержит 190 страниц машинописного текста, включает 47 рисунков, 33 таблиц. Список литературы из 130 источников.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена актуальность работы, ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель и основные задачи исследований и положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** представлен обзор современных конструкций скрубберов, используемых для охлаждения и мокрой очистки дымовых и технологических газов. Рассмотрены основные типы аппаратов: скруббера Вентури, барботажные и насадочные скруббера, приведены их достоинства и недостатки, а также особенности эксплуатации. Описаны методы моделирования процессов тепломассообмена и сепарации аэрозолей. Проанализированы работы по математическому моделированию и характеристикам различных типов насадок, используемых в скрубберах. Особое внимание уделено вопросам повышения эффективности тепло- и массообмена, а также очистки газов от аэрозольных частиц. Отмечены перспективные направления модернизации оборудования, включая применение новых типов насадок с интенсификаторами. Выявлены актуальные задачи,

требующие дальнейших исследований, особенно в части разработки высокоэффективных контактных устройств и совершенствования методов численного моделирования.

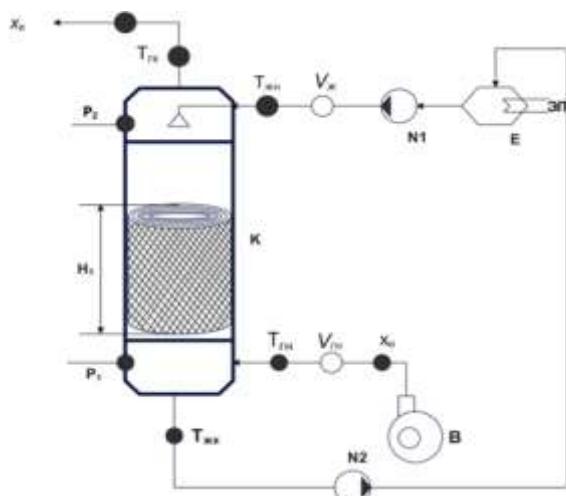


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки: К – колонна; В – вентилятор;  $N$  – насосы; Е – емкость;  $H_1$  – высота слоя насадки; ЭЛ – электронагреватель воды

В качестве насадки применялась рулонная сетчатая конструкция из полимерного материала с удельной поверхностью  $a_v = 240 \text{ м}^2/\text{м}^3$  и высотой слоя  $H = 1,0 \text{ м}$ . Исследования проводились при скорости воздуха от 0,5 до 2,5 м/с и плотности орошения в диапазоне  $4,9\text{--}15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ . Для оценки погрешностей велась многократная регистрация параметров. Погрешность измерений составила  $\pm 8\text{--}12 \%$  в зависимости от характеристик измерительных приборов.

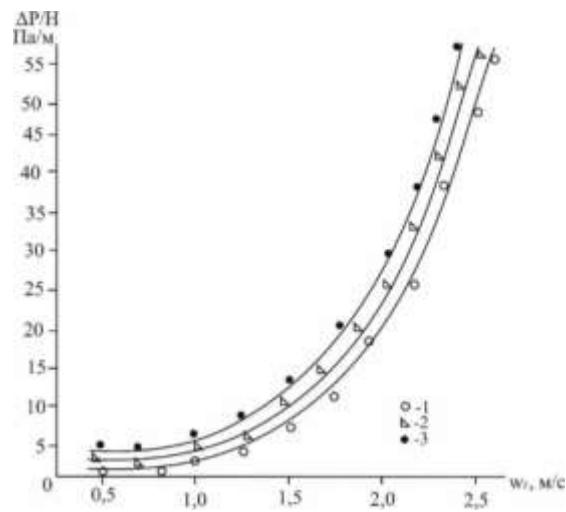


Рисунок 2 – Зависимость удельного перепада давления орошающей рулонной насадки от скорости воздуха в колонне.

Плотность орошения:  $1 - q_{\text{ж}} = 4,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение гидравлических и массообменных характеристик колонных аппаратов, оснащённых регулярными и комбинированными насадками. Основное внимание уделено процессам взаимодействия фаз при противоточном движении воды и воздуха, а также рассмотрению методики расчёта скруббера-охладителя газа.

*Описание экспериментальной установки и методика проведения исследований.* На рисунке 1 представлена экспериментальная установка, состоящая из колонны диаметром 200 мм и высотой 2 м, выполненной из прозрачного оргстекла. Для подачи воды и воздуха были использованы насос и радиальный вентилятор, соответственно. Кроме того, в состав установки входят ёмкости, измерительные приборы (термоанемометры, диффманометры, влагомеры) и теплообменное оборудование.

рулонная сетчатая конструкция из полимерного

На рис. 2 представлены экспериментальные данные по удельному перепаду давления воздуха для орошаемой насадки при различных плотностях орошения. Гидравлическое сопротивление оценивалось по перепаду давления на участке насадки также при различных плотностях орошения.

Из представленных результатов следует, что перепад давления увеличивается при повышении как скорости воздуха, так и плотности орошения. Причем от скорости воздуха зависимость более сильная, что соответствует характеру изменения  $\Delta P/H$  в известных экспериментальных исследованиях различных типов насадок.

Результаты экспериментальных данных для сухой и орошаемой сетчатой насадки обобщены эмпирическими выражениями (1) и (3) в интервале погрешности  $\pm 12\text{--}15\%$ .

$$\xi_{\text{cvx}} = 0,015 \text{Re}_{\text{F}}^{0,15} + 7,1 \cdot 10^{-7} \text{Re}_{\text{F}}^{3/2} \quad (1)$$

при  $500 < \text{Re}_\Gamma < 2500$ .

### Перепад давления в сухой насадке:

$$\Delta P_{\text{сух}} = \xi_{\text{сух}} \frac{H}{d_3} \frac{\rho_\Gamma w_\Gamma^2}{2 \varepsilon_{\text{св}}^2}. \quad (2)$$

Перепад давления орошаемой насадки в интервале погрешности  $\pm 12\text{--}15\%$  получен в виде

$$\Delta P_{\text{оп}} = \Delta P_{\text{сух}} \left( 1 + 0,13 q_{\text{ж}}^{0,18} \right) \quad (3)$$

при  $4,8 < q_{\text{ж}} < 16,0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

В таблице 1 представлены экспериментальные данные объемных коэффициентов массоотдачи  $\beta_{\Gamma v}$  и числа единиц переноса  $N_\Gamma$  в колонне с рулонной сетчатой насадкой высотой  $H = 1,0 \text{ м}$ ,  $a_v = 240 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Таблица 1 – Экспериментальные данные объемных коэффициентов массоотдачи  $\beta_{\Gamma v}$  и числа единиц переноса  $N_\Gamma$  в колонне с рулонной сетчатой насадкой высотой  $H = 1,0 \text{ м}$ ,  $a_v = 240 \text{ м}^2/\text{м}^3$

$w_\Gamma, \text{ м/с}$							
0,5	0,75	0,97	1,2	1,53	1,94	2,26	2,5
$q_{\text{ж}} = 4,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$							
$\beta_{\Gamma v}, \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$							
0,905	1,244	1,71	2,18	2,75	3,58	4,37	4,46
Число единиц переноса $N_\Gamma$							
1,82	1,65	1,75	1,81	1,79	1,85	1,93	1,80
$q_{\text{ж}} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$							
$\beta_{\Gamma v}, \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$							
1,09	1,613	1,878	2,40	2,979	3,946	4,718	5,10
Число единиц переноса $N_\Gamma$							
2,18	2,14	2,0	2,0	1,94	2,03	2,08	2,06
$q_{\text{ж}} = 15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$							
$\beta_{\Gamma v}, \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$							
1,095	1,605	1,897	2,41	2,99	3,98	4,79	5,11
Число единиц переноса $N_\Gamma$							
2,30	2,20	2,20	2,16	2,10	2,22	2,21	2,22

При охлаждении воды в градирнях температура воды, подаваемой на охлаждение, обычно составляет  $T_{\text{жн}} = 38\text{--}42^\circ\text{C}$ , а температура и влажность воздуха зависят от метеорологических условий. В скрубберах-охладителях температура газа может достигать  $200\text{--}300^\circ\text{C}$ , а воды –  $10\text{--}50^\circ\text{C}$ . Следует отметить, что применение полимерных насадок ограничивается температурами до  $100\text{--}130^\circ\text{C}$ .

В результате на основе выражения (4) получена критериальная зависимость при  $H = 1,0 \text{ м}$ , обобщающая экспериментальные данные ( $\pm 10\text{--}12\%$ ) при  $Re_\Gamma = 500 \div 2500$ :

$$Sh_{\Gamma f} = 0,88 Re_\Gamma^{0,97} Re_{\text{ж}}^{0,18} Sc_\Gamma^{1/3}, \quad (5)$$

в которой  $Sh_{\Gamma f} = \beta_{\Gamma f} \cdot d_3 / D_\Gamma$  – число Шервуда, где коэффициент массоотдачи отнесен к площади поперечного сечения насадки;  $Re_\Gamma = 4w_\Gamma / (a_v v_\Gamma)$ ,  $Re_{\text{ж}} = 4q_{\text{ж}} / (a_v v_{\text{ж}})$  – числа Рейнольдса.

Показатель степени при числе Шмидта  $Sc_\Gamma$  взят на основе многочисленных экспериментальных данных различных авторов по массоотдаче в газовой фазе для насадочных колонн.

Из полученных экспериментальных данных следует, что при увеличении скорости воздуха объемный коэффициент массоотдачи значительно повышается, что связано как с турбулизацией воздуха, так и снижением толщины пограничного слоя на границе раздела фаз. Зависимость от плотности орошения более слабая, так как основное сопротивление переносу сосредоточено в газовой фазе. Повышение коэффициента массоотдачи в зависимости от плотности орошения связано с увеличением смоченной поверхности насадки и перепада давления. Получено эмпирическое выражение ( $\pm 12\%$ ) для рулонной сетчатой насадки:

$$\beta_{\Gamma v} = 1,43 q_{\text{ж}}^{0,18} w_\Gamma^{0,97} \quad (4)$$

при  $w_\Gamma = 0,5\text{--}2,5 \text{ м/с}$ ;  $q_{\text{ж}} = 4,9\text{--}15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Выражение (4) справедливо для системы воздух–вода при температуре  $20^\circ\text{C}$  в исследованном интервале нагрузок по фазам.

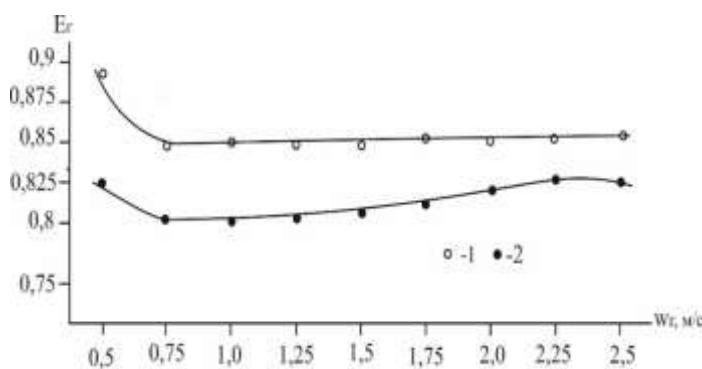


Рисунок 3 – Зависимость эффективности увлажнения воздуха водой от скорости воздуха в колонне с рулонной сетчатой насадкой: 1 –  $q_{\text{ж}} = 15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; 2 –  $q_{\text{ж}} = 4,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

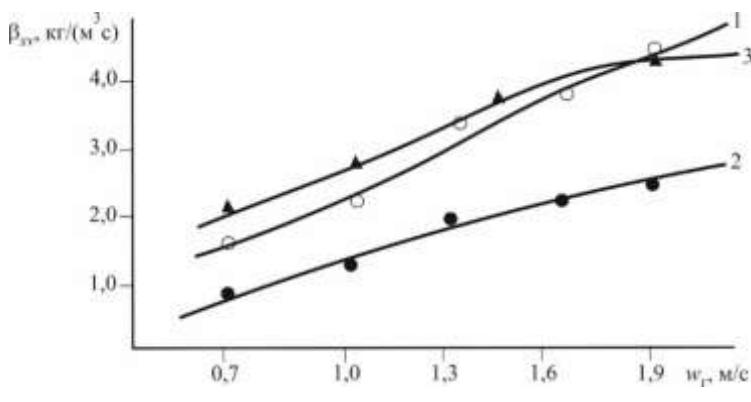
Точки – осредненные экспериментальные данные

$$H = \left( h_{\text{ор}} + \frac{d_{\vartheta}}{2} \left( \frac{4}{\text{Pe}_{\text{ЭГ}}} + \frac{1}{\text{Pe}_{\text{ЭЖ}}} \right) \right) \frac{I_{\text{Н}} - I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{ср}}}, \quad (6)$$

где числа Пекле  $\text{Pe}_{\text{ЭГ}}$ ,  $\text{Pe}_{\text{ЭЖ}}$  (критерии Боденштейна) учитывают обратное перемешивание теплоносителей;  $h_{\text{ор}} = G / \beta_{xv} S_{\text{K}}$  – высота единиц переноса, м.

Экспериментально исследован комбинированный насадочный слой из сетки ( $H = 1,0 \text{ м}$ ) с хаотичной мелкой насадкой «Инжехим-2012», расположенной в нижней части колонны под регулярной ( $H = 0,2 \text{ м}$ ).

На рисунке 4 представлены экспериментальные зависимости объемного коэффициента массоотдачи для комбинированных насадок с одинаковой высотой слоя и плотностью орошения при увлажнении воздуха водой, а также для металлической пакетной насадки IRG ( $a_v = 162 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ) из гофрированных пластин. Первая кривая – исследованная в данной работе насадка, а вторая – комбинированная насадка из вертикального пучка полимерных труб 50 мм ( $a_v = 110 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ) с дискретно-регулярной шероховатостью ( $H = 1,0 \text{ м}$ ) в комбинации с хаотичной в виде колец Рашига ( $H = 0,2 \text{ м}$ ), где цилиндры 50×50 мм выполнены из таких же труб. Из результатов следует, что коэффициент  $\beta_{xv}$  больше примерно в два раза у сетчатой насадки в комбинации с «Инжехим-2012». У насадки IRG объемный коэффициент массоотдачи (кривая 3) больше сетчатой комбинированной при скорости воздуха от 0,7 до 1,7 м/с примерно на 5–20 %. При  $w_r > 1,9 \text{ м/с}$  объемный коэффициент массоотдачи (кривая 3) снижается по сравнению с сетчатой комбинированной насадкой (кривая 1). Таким образом, коэффициент массоотдачи в комбинированном насадочном слое довольно высокий по сравнению с некоторыми другими регулярными насадками, как и массообменная эффективность (таблица 2).



На рис. 3 представлены зависимости эффективности массообмена в газовой фазе от скорости воздуха при различных плотностях орошения водой. Эффективность при скорости воздуха от 0,5 до 2,5 м/с и плотности орошения от 4,9 до 15,9  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  находится в интервале  $E_r$  от 0,8 до 0,87 и при повышении скорости воздуха незначительно снижается, а при увеличении плотности орошения увеличивается.

Выполнена модификация метода единиц переноса с учетом обратного перемешивания газа и жидкости в исследованной насадке. В результате получено выражение для расчета высоты насадочного слоя в виде

$$H = \left( h_{\text{ор}} + \frac{d_{\vartheta}}{2} \left( \frac{4}{\text{Pe}_{\text{ЭГ}}} + \frac{1}{\text{Pe}_{\text{ЭЖ}}} \right) \right) \frac{I_{\text{Н}} - I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{ср}}}, \quad (6)$$

Рисунок 4 – Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от скорости воздуха при плотности орошения  $q_{\text{ж}} = 4,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ : 1 – комбинированная рулонная насадка из сетки ( $H = 1,0 \text{ м}$ ) и хаотичной «Инжехим-2012» ( $H = 0,2 \text{ м}$ ); 2 – комбинированная насадка из вертикальных полимерных труб с шероховатой поверхностью ( $H = 1,0 \text{ м}$ ) и хаотичной из колец 50 мм ( $H = 0,2 \text{ м}$ ); 3 – пакетная металлическая насадка IRG ( $H = 1,0 \text{ м}$ ) без хаотичной

Таблица 2 – Массообменная эффективность комбинированной насадки

$w_{\Gamma}$ , м/с	0,5	0,75	0,97	1,2	1,53	1,94	2,26	2,5
при $q_{\text{ж}} = 4,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$								
$E_{\Gamma 1}$	0,83	0,812	0,821	0,821	0,815	0,822	0,837	0,812
$E_{\Gamma 2}$	0,52	0,48	0,47	0,44	0,43	0,40	0,39	0,38
$E_{\Gamma}$	0,918	0,902	0,905	0,900	0,894	0,893	0,900	0,883
при $q_{\text{ж}} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$								
$E_{\Gamma 1}$	0,880	0,878	0,848	0,854	0,852	0,855	0,862	0,859
$E_{\Gamma 2}$	0,60	0,57	0,55	1,22	0,50	0,48	0,47	0,46
$E_{\Gamma}$	0,952	0,947	0,931	0,929	0,926	0,924	0,926	0,923
при $q_{\text{ж}} = 15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$								
$E_{\Gamma 1}$	0,878	0,854	0,852	0,846	0,835	0,850	0,847	0,850
$E_{\Gamma 2}$	0,66	0,63	0,60	0,57	0,56	0,53	0,52	0,51
$E_{\Gamma}$	0,958	0,945	0,941	0,927	0,927	0,929	0,926	0,926
Примечания								
Е <sub>Г1</sub> – рулонная насадка из сетки (Н = 1,0 м).								
Е <sub>Г2</sub> – хаотичная «Инжехим-2012» (Н = 0,2 м).								
Е <sub>Г</sub> – общая эффективность комбинированного слоя								

В третьей главе представлена математическая модель процесса охлаждения и сепарации аэрозолей в колонне с различными насадками. Основное внимание уделено описанию одно- и двумерных моделей, основанных на законах сохранения энергии и массы, с учётом межфазного переноса теплоты и влаги. Модели учитывают возможность неоднородного распределения фаз и позволяют прогнозировать эффективность работы аппарата. Для скруббера с регулярными или хаотичными насадками ниже представлена система уравнений совместного переноса теплоты и массы, а также дисперсной фазы в цилиндрической системе координат колонны при пленочном противотоке фаз.

Уравнение конвективного теплообмена:

– в жидкой фазе:

$$u_{\text{ж}}(r)\rho_{\text{ж}}c_{\text{рж}} \frac{\partial T_{\text{ж}}}{\partial z} = \frac{\lambda_{\text{ж}}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T_{\text{ж}}}{\partial r} \right] + \lambda_{\text{ж}} \frac{\partial^2 T_{\text{ж}}}{\partial z^2} + \frac{qdF}{dV}; \quad (7)$$

– в газовой фазе:

$$\rho_{\Gamma}W_{\Gamma}(r) \frac{\partial I}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda_{\text{тр}} \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_{\text{тр}} \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial z} - \frac{qdF}{dV}. \quad (8)$$

Уравнение переноса влаги в газовой фазе:

$$W_{\Gamma}(r) \frac{\partial x}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r D_{\text{тр}} \frac{\partial x}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} D_{\text{тр}} \frac{\partial x}{\partial z} + \frac{j_x dF}{dV}. \quad (9)$$

Уравнение переноса тонкодисперсной фазы:

$$W_{\Gamma}(r) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r D_{\text{тд}} \frac{\partial C}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} D_{\text{тд}} \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{j_c dF}{dV}, \quad (10)$$

где  $dF/dV$  – удельная поверхность контакта фаз в локальном объеме слоя,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ; при  $z = 0$  – вход газа и выход жидкости в нижней части колонны,  $j_x$ ,  $j_c$  – плотности потока массы, влаги и частиц, осаждаемых на стенки аппарата (или на сепарационную поверхность).

В уравнениях (7)–(10) скорости  $u_{\text{ж}}(r)$ ,  $W_{\Gamma}(r)$  записаны как функции радиальной координаты  $(r)$ .

При составлении математической модели приняты следующие допущения:

– основной тепло- и массообмен и сепарация дисперсной фазы (более 90 %) происходит в насадочной зоне при пленочном режиме;

- основное сопротивление тепломассообмену сосредоточено в газовой фазе (более 99 %);
- движение фаз стационарное и стабилизированное;
- режим движения газа в слое насадки турбулентный;
- срыв и унос капель жидкости с поверхности стекающей пленки незначителен;
- стенки колонны теплоизолированные от окружающей среды.

На рисунках 5 и 6 для проверки адекватности математической модели представлены

профиль температуры газа и профиль влагосодержания, полученные из численного решения системы уравнений (7)–(9) при равномерном распределении газа и жидкости, и экспериментальные данные. При решении использовалось известное выражение, связывающее энталпию  $I$ , влагосодержание  $x$ , температуру газа  $T_g$ , удельные теплоемкости сухого газа  $c_p$  сух и теплоемкость пара  $c_{pp}$ :  $I = (c_{p,ух} + c_{pp}x)T_g + R_{ж}x$ . Получено удовлетворительное согласование с экспериментом Аронова для колец Рашига при  $W_g = 0,4$  до  $1,9$  м/с и плотности орошения  $q_{ж} = 3$ – $55$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч).

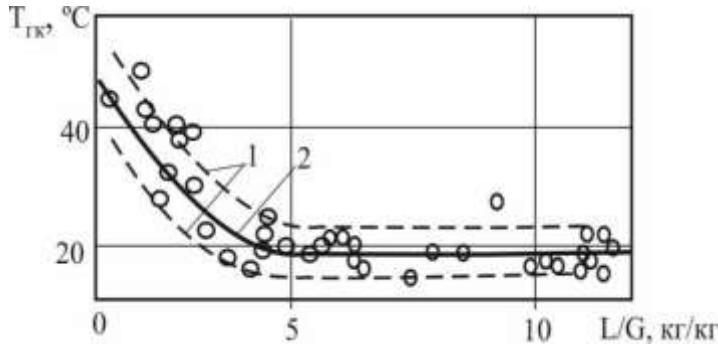


Рисунок 5 – Зависимость температуры уходящих газов от коэффициента орошения для насадки из керамических колец размерами  $35 \times 35 \times 4$  мм при начальной температуре газов  $T_{гн} = 250$ – $280$  °C и воды  $T_{жн} = 12$  °C. Высота насадки – 1000 мм.  
 1–1 – область расчетных значений;  
 2 – осредненная кривая; сплошная линия – расчет; точки – эксперимент [Аронов]

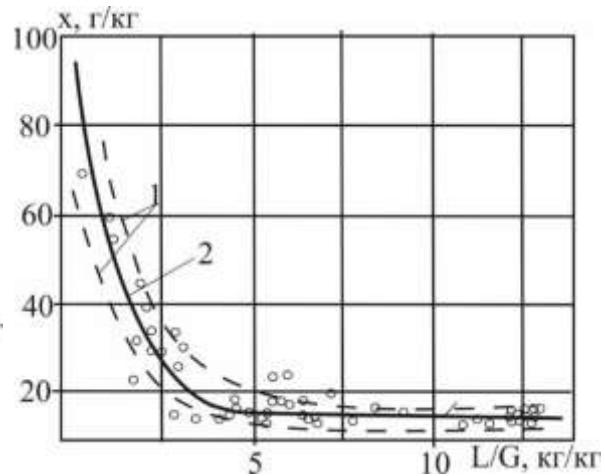


Рисунок 6 – Зависимость влагосодержания уходящих газов от коэффициента орошения

Тепловая эффективность нагрева воды и конденсации влаги:

$$E_{ж} = \frac{T_{кж} - T_{нж}}{T_{нг} - T_{нж}}, \quad E_{г} = \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{к}}}{x_{\text{н}} - x_{\text{к}}^*}, \quad (11, 12)$$

где  $x_{\text{к}}^* = f(T_{жн}$  при  $u = 100\%$ ).

Эффективность сепарации дисперсной фазы:

$$\eta = (C_{\text{н}} - C_{\text{к}}) / C_{\text{н}}. \quad (13)$$

Конечные значения температур  $T_{кг}$ ,  $T_{кж}$ , влагосодержания  $x_{\text{к}}$  и концентрация дисперсной фазы  $C_{\text{к}}$  находятся из решения системы уравнений (7)–(10).

На гистограмме (рисунок 7) представлены расчетные данные высоты насадки, которая необходима для достижения тепловой эффективности в газовой фазе при плотности орошения  $15$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) и средней скорости газа  $W_g = 1,5$  м/с. Также даны значения перепада давления.

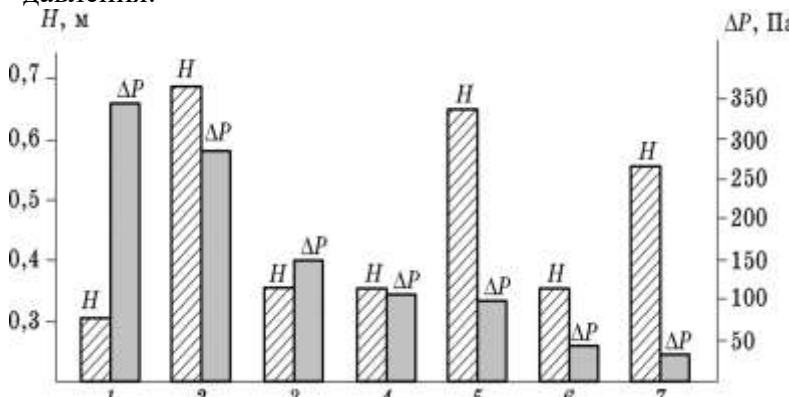


Рисунок 7 – Требуемая высота насадочного слоя и перепад давления при заданной эффективности  $E_{\text{г}} = 0,8$ .  
 Хаотичные насадки: 1 – кольца Рашига (25 мм); 2 – кольца Рашига (50 мм); 3 – кольца Мебиуса (40 мм); 4 – «Инжехим-2012» (24 мм); 5 – «Инжехим-2012» (45 мм).  
 Регулярные насадки: 6 – сегменто-регулярная; 7 – рулонная гофрированная

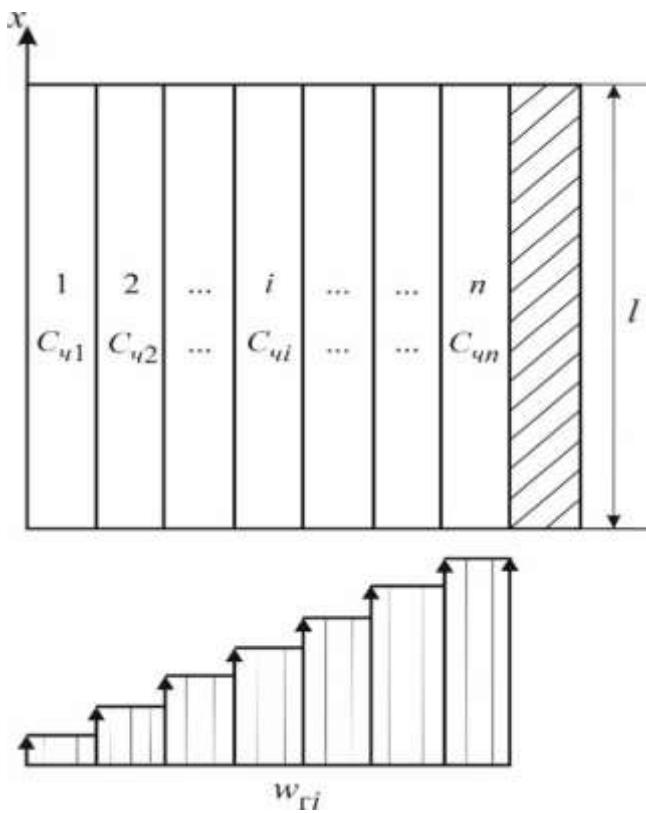


Рисунок 8 – Условное деление насадочного слоя на ряд параллельных каналов в направлении движения аэрозольной системы

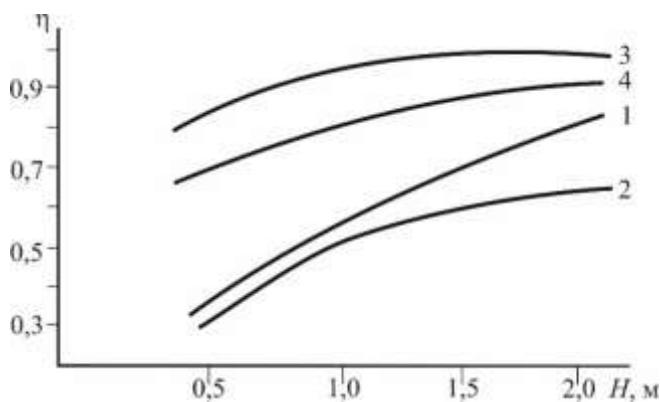


Рисунок 9 – Зависимость эффективности сепарации аэрозолей от высоты насадочного слоя: 1, 2 – кольца Рашига 50 мм; 3, 4 – 25 мм. 1, 3 – равномерное распределение газа; 2, 4 – неравномерный профиль скорости в зоне у стенки в центре.  
Средняя скорость газа  $w_r = 6$  м/с

При равномерном распределении жидкой фазы (кривая 1) и увеличении неравномерности распределения газовой от  $w_m / w_0 = 1$  до  $w_m / w_0 = 1,5$  (локальная скорость  $w_m$  в центре скруббера больше на 50 % средней скорости  $w_0$ ), снижение эффективности  $E_r$  составляет от 0,8 до 0,75, т. е. примерно 6–7 %, а при неравномерном распределении как жидкой, так и газовой фаз эффективность снижается на 30 % (кривая 2) (рисунок 10).

Для математического моделирования профилей температур и концентраций дисперсной фазы в газах и расчета локальной и средней эффективности разделения аэрозольных систем представлен насадочный слой в виде параллельных каналов по высоте (рисунок 8).

Система дифференциальных уравнений (7)–(10) решается численно методом прогонки при заданных начальных условиях и профиля скорости.

На рисунке 9 представлены результаты расчета при высоте слоя от 0,5 до 2,0 м. Установлено, что для насадки 50 мм при  $H = 2,0$  м снижение эффективности составило около 33 %, при  $H = 0,5$  м – около 5 %. Для насадки 25 мм снижение эффективности сепарации – от 11 % ( $H = 2,0$  м) до 18 % ( $H = 0,5$  м).

На рисунке 10 показаны результаты зависимости тепловой эффективности охлаждения газа  $E_r$  при наличии неравномерностей распределения жидкой и газовой фаз.

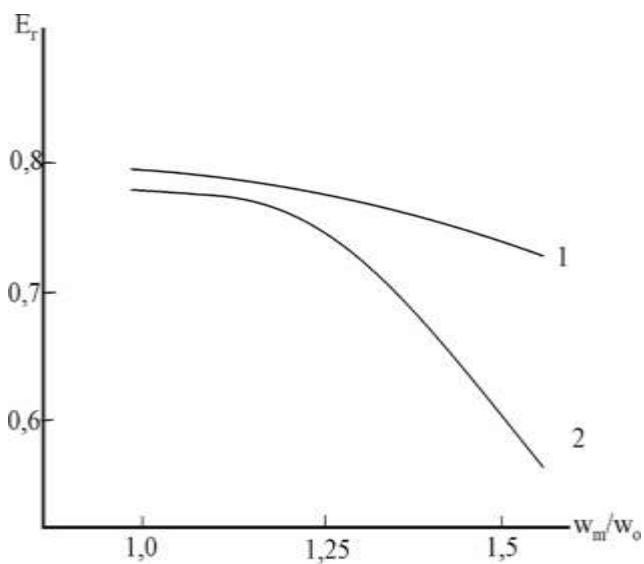


Рисунок 10 – Влияние неравномерности газового потока на тепловую эффективность охлаждения газа водой в колонне с кольцами Рашига 50 мм: 1 – равномерное распределение жидкой фазы; 2 – скорость жидкости в пристенной зоне в 1,6 раза выше средней по колонне;  $W_0 = 1$  м/с;  $q_{ж} = 30$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч)

Таким образом, разработанная математическая модель охлаждения и сепарации аэрозольных систем позволяет прогнозировать снижение эффективности охлаждения газов и разделения аэрозолей при неоднородном профиле скорости газа в слое. Для снижения неравномерности следует применять специальные перераспределители фаз.

**В четвертой главе представлена** разработанная математическая модель процессов тепломассообмена в барботажном скруббере, предназначенная для расчета увлажнения и охлаждения газа при прохождении через слой жидкости с барботажем. Особенностью модели является учёт равновесных значений влагосодержания и энталпии газа, а также изменение температуры в газовой фазе вдоль высоты слоя.

Тепловую эффективность в газовой фазе записывают через разность удельных энталпий  $I$ , Дж/кг:

$$E_{\Gamma} = \frac{I_{\text{K}} - I_{\text{H}}}{I_{\text{cp}}^* - I_{\text{H}}}. \quad (14)$$

Массообменная эффективность переноса влаги при охлаждении жидкости:

$$E_x = \frac{x_{\text{K}} - x_{\text{H}}}{x_{\text{cp}}^* - x_{\text{H}}}, \quad (15)$$

где  $x$  – влагосодержание, кг/кг;  $x_{\text{cp}}^*$  – влагосодержание на линии насыщения ( $\varphi = 100\%$ ) при  $T_{\text{ж cp}}$ ;  $\varphi$  – относительная влажность, %.

Согласно принятой модели идеального вытеснения газа эффективность процессов можно выразить с применением теплового  $N_{\text{ог}}$  и массообменного  $N_{\text{ox}}$  чисел единиц переноса, тогда

$$E_{\Gamma} = 1 - \exp(-N_{\text{ог}}); \quad E_x = 1 - \exp(-N_{\text{ox}}), \quad (16)$$

где  $N_{\text{ог}} = K_{\Gamma} F / (V_{\Gamma} \rho_{\Gamma} c_{\text{pr}})$ ;  $N_{\text{ox}} = K_x F / V_{\Gamma}$ ;  $K_{\Gamma}$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $K_x$  – коэффициент массопередачи, м/с;  $F$  – площадь поверхности контакта фаз, м<sup>2</sup>;  $V_{\Gamma}$  – объемный расход газа, м<sup>3</sup>/с;  $c_{\text{pr}}$  – удельная теплоемкость газа, Дж/(кг·К).

Тепловую эффективность охлаждения газа при непосредственном контакте с жидкостью запишем в известной форме при условии идеального вытеснения газа:

$$E_{\Gamma} = \frac{T_{\text{гн}} - T_{\text{гк}}}{T_{\text{гн}} - T_{\text{жк}}} = 1 - \exp(-N_{\Gamma}), \quad (17)$$

где  $T_{\text{гн}}$ ,  $T_{\text{гк}}$  – начальная и конечная температуры газа, °С;  $T_{\text{жк}}$  – конечная температура охлаждающей жидкости, которая при условии идеального смешения будет равна средней, т. е.  $T_{\text{жк}} = T_{\text{ж cp}}$ ;  $N_{\Gamma}$  – тепловое число единиц переноса.

Расчет тепловой эффективности (17) для провальных и ситчатых тарелок удовлетворительно согласуется с экспериментальными известными данными (рисунок 11).

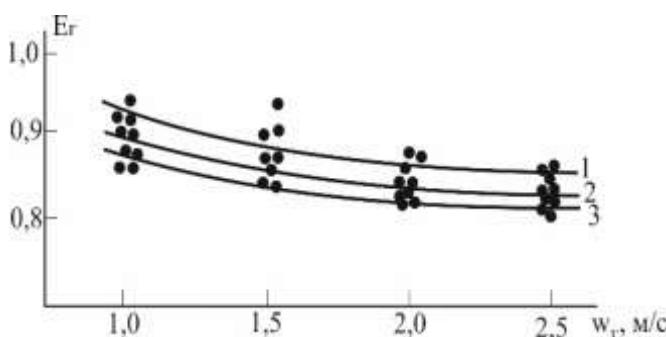


Рисунок 11 – Зависимость эффективности провальных и ситчатых тарелок от скорости газа при  $T_{\text{гн}} = 200$  °С.  
Высота газожидкостного слоя:  
1 – 0,105 м; 2 – 0,055 м; 3 – 0,03 м. Точки – экспериментальные данные Позина;  
сплошные линии – расчет

**В пятой главе** приведены научно-технические решения по модернизации скруббера К-5, применяемого для охлаждения и очистки пирогаза на установке газоразделения АО «Казаньоргсинтез». Проведён анализ существующей схемы аппарата и технологического процесса. Предложена замена устаревших тарельчатых элементов на современные

регулярную и нерегулярную насадки, обладающие повышенной эффективностью тепло- и массообмена. Исходя из предельных нагрузок по фазам были выбраны технические характеристики насадок. В верхней секции  $a_v = 150 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ; в нижней –  $a_v = 70 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . В нижней секции размер хаотичной насадки составляет 60 мм и ограничен скоростью захлебывания, так как при меньшем размере элемента происходит подвисание и захлебывание насадки, то есть режим становится нерабочим. В верхней секции колонны К-5 было предложено и обосновано применение регулярной рулонной гофрированной насадки из нержавеющей ленты с шероховатой поверхностью ( $a_v = 150 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ,  $\varepsilon_{\text{св}} = 0,96$ ) и высотой слоя  $H = 2,0 \text{ м}$ . Расход охлаждающей воды, которая также способствует эффективной «мокрой» очистке пирогаза от кокса и смол, составила  $L = 135 \text{ т/ч}$  или  $136 \text{ м}^3/\text{ч}$  с начальной температурой около  $33^\circ\text{C}$ . Плотность орошения  $q_{\text{ж}} = 54 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , средняя скорость пирогаза  $w = 3,6 \text{ м/с}$ , фактор скорости  $f = w_{\Gamma} \sqrt{\rho_{\Gamma}} = 3,7 \text{ Па}^{0,5}$ . Гидродинамический режим довольно интенсивный. Был произведен расчёт коэффициента гидравлического сопротивления сухой насадки, а также перепада давления, затем перепада давления орошаемой насадки, коэффициента сопротивления, динамической скорости, коэффициента сопротивления сухой насадки, коэффициента сопротивления орошаемой насадки, тепловой эффективности и эффективности сепарации аэрозольных частиц. По математической модели (глава 3) выполнены расчеты профилей влагосодержания и температуры пирогаза по секциям (рисунки 12 и 13).

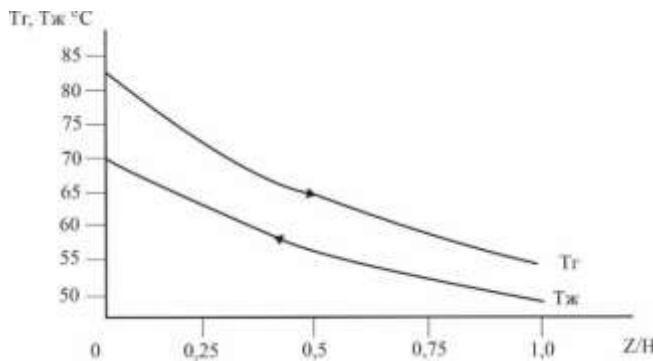


Рисунок 12 – Профили температур пирогаза и воды в нижней насадочной секции с регулярной насадкой.  $Z/H = 0$  – вход пирогаза и выход воды;  $Z/H = 1,0$  – выход пирогаза и вход воды

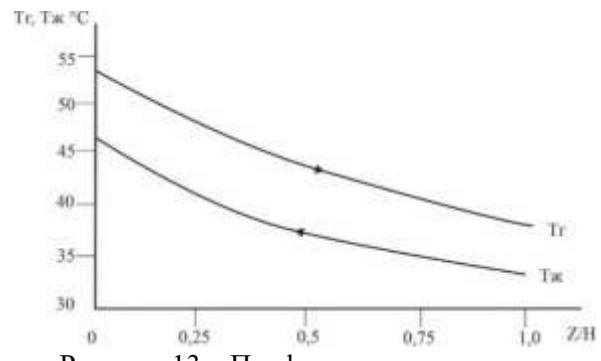


Рисунок 13 – Профили температур пирогаза и воды в верхней секции с нерегулярной насадкой.  $Z/H = 0$  – вход пирогаза после нижней секции и выход нагретой воды;  $Z/H = 1,0$  – выход после охлаждения и вход охлаждающей воды на насадку

С применением математической модели (глава 3) при допущении о равномерном распределении фаз выполнены расчеты профилей концентраций частиц с размерами от 1,0 до 10,0 мкм по высоте как верхней, так и нижней секций.

Из расчетов следует, что эффективность сепарации в верхней секции выше примерно на 40–50 % относительных, чем в нижней. Это можно объяснить, что рулонная гофрированная насадка имеет большую удельную поверхность  $150 \text{ м}^2/\text{м}^3$  относительно хаотичной  $70 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Суммарная эффективность сепарации в скруббере:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2). \quad (18)$$

Для частиц с размерами более 7 мкм суммарная эффективность составляет более 90 %, а при размере более 9 мкм – достигает 99 %.

После выполненной совместно с сотрудниками ООО ИВЦ «Инжехим» модернизации скруббера К-5 насадки работают в устойчивом гидродинамическом режиме, перепад давления пирогаза в пределах допустимых значений (0,15–0,2 атм) и в процессе эксплуатации с декабря 2024 г. по сентябрь 2025 г. не увеличивается. Это свидетельствует о том, что насадки не забиваются дисперсной фазой, которая после мокрого улавливания удаляется вместе с водой из кубовой части скруббера, а вода далее поступает на очистку и охлаждение согласно технологической схеме действующего производства.

## Заключение

В соответствии с поставленной целью и задачами в диссертационной работе выполнены:

1. Серия экспериментов и получены экспериментальные данные по перепаду давления, объёмному коэффициенту массоотдачи и эффективности массообмена при увлажнении воздуха в колонных аппаратах, оснащённых регулярной полимерной сетчатой насадкой и комбинированными расположениями с нерегулярной металлической насадкой. Получены эмпирические выражения для расчета  $\Delta P_{\text{оп}}$  и  $\beta_{\text{xv}}$ . Установлена высокая эффективность (85-90 %) массообмена.

2. Построена математическая модель, основанная на системе дифференциальных уравнений в частных производных, с учётом тепломассообмена и сепарации аэрозолей через локальные межфазные источники и коэффициенты турбулентного переноса. Показано влияние неравномерности профиля скорости газа на эффективность процессов в насадочном скруббере.

3. Разработан алгоритм для расчёта тепловой эффективности и конструктивных характеристик ситчатых и струйных тарелок в условиях совместного охлаждения газового потока и сепарации аэрозольных частиц в скруббере.

4. Полученные результаты могут быть применены при модернизации промышленных теплообменных и очистных установок, в том числе в энергетике, с целью повышения эффективности процессов охлаждения и очистки газов. Предложенные научные подходы используются при выполнении фундаментальных и прикладных научных исследований сотрудниками ИММ КазНЦ РАН и ИВЦ «Инжехим», а также в учебном процессе.

5. Разработаны и внедрены научно-технические решения по модернизации промышленного скруббера очистки и охлаждения пирогаза в производстве этилена на АО «Казаньоргсинтез». Промышленная эксплуатация аппарата после модернизации показывают соответствие техническому заданию.

## Условные обозначения

$a_v$  – удельная поверхность насадки,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $x$  – влагосодержание,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;  $x^*$  – влагосодержание насыщенного газа,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;  $c_p$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $D$ ,  $D_t$  – коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $d_3$  – эквивалентный диаметр насадки,  $\text{м}$ ;  $E$  – эффективность;  $F$  – площадь поверхности контакта фаз,  $\text{м}^2$ ;  $G$  – массовый расход газа,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $H$  – высота слоя насадки,  $\text{м}$ ;  $K_x$  – коэффициент массопередачи;  $K_r$  – коэффициент теплопередачи;  $L$  – массовый расход жидкости,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $n$  – число каналов;  $N$  – тепловое число единиц переноса;  $I$  – энталпия газа,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $q$  – плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $q_{\text{ж}}$  – плотность орошения,  $\text{м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ ;  $\eta$  – эффективность сепарации;  $\Delta P$  – перепад давления,  $\text{Па}$ ;  $C$  – концентрация дисперсной фазы,  $\text{Вт}$ ;  $r$  – радиальная координата,  $\text{м}$ ;  $j_x$ ,  $j_c$  – плотности потока и массы частиц;  $T$  – температура потока,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $u_{\text{ср}}$  – средняя скорость среды,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $V$  – объем,  $\text{м}^3$ ;  $V_r$  – объемный расход газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $w_t$  – средняя скорость газа в колонне,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи,  $\text{м}/\text{с}$  или  $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ ;  $\beta_{\text{xv}}$  – объемный коэффициент массоотдачи  $\text{кг}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$ ;  $\epsilon_{\text{св}}$  – удельный свободный объем насадки;  $\lambda$  – удельная теплопроводность,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\nu$ ,  $\nu_r$  – кинематические коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления насадки;  $\rho$  – плотность фазы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $h_{\text{ог}}$  – высота единиц переноса;  $x$  – вертикальная координата,  $\text{м}$ ;  $Re = u_{\text{ср}}l/D_{\text{п}}$  – число Пекле структуры потока (критерий Боденштейна);  $Re = u_{\text{ср}}l/\nu$  – число Рейнольдса;  $G$ ,  $g$  – газовая фаза;  $gr$  – значение параметров на границе раздела фаз;  $\text{ж}$ ,  $x$  – жидккая фаза;  $\text{к}$  – значение параметров на выходе;  $\text{и}$  – значение параметров на входе;  $\text{оп}$  – орошаемая насадка;  $\text{п}$  – пар;  $\text{с}$  – сплошная фаза;  $\text{ср}$  – среднее значение;  $\text{ст}$  – значение параметров на стенке;  $\text{сух}$  – сухая насадка;  $\text{т}$  – турбулентность;  $\varrho$  – эквивалентный,  $\text{ог}$  – тепловое,  $\text{ox}$  – массообменное.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

*В изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования*

*Российской Федерации:*

1. Лаптев, А. Г. Эффективность охлаждения жидкостей в турбулентном барботажном слое на ситчатых тарелках / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева, С. У. Аласгарли // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 6. – С. 13–24.
2. Лаптева Е. А., Аласгарли С. У. О., Ключкова В. А. Поликанальная математическая модель разделения жидких аэрозольных систем в насадочных скрубберах-охладителях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27. – № 1. – С. 126–138.
3. Лаптев А. Г., Лаптева Е. А., Хамидуллин Р. Н., Аласгарли С. У. Экспериментальные гидравлические и массообменные характеристики процессов в колонне с комбинированной рулонной и нерегулярной насадками // Промышленные процессы и технологии. – 2025. – Т. 5. – № 1(15). – С. 100–111.

**В изданиях, включенных в международную базу цитирования SCOPUS**

**и Web of Science:**

4. Lapteva E.A., Laptev A.G., Alasgarli S.U. Mathematical model of contact cooling and purification of the dispersed phase of gases in packed scrubbers // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2022. – Т. 56. – № 2. – С. 244–251.
5. Lapteva E., Alasgarli S. U. Mathematical models of heat transport in film apparatus with intensifiers for gas cooling and water heating // Transportation Research Procedia. – 2022. – Vol. 63. – P. 2978–2983.

## Объекты интеллектуальной собственности

6. Патент № 2846580 Российской Федерации. Комбинированный насадочный аппарат для охлаждения и очистки газов: заявл. 03.12.2024; опубл. 09.09.2025 / Лаптев А. Г., Лаптева Е. А., Аласгарли С. У.; заявитель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

## Публикации в других изданиях и материалах конференций:

7. Лаптев А. Г., Лаптева Е. А., Аласгарли С. У. Экспериментальные гидравлические и массообменные характеристики колонны с рулонной сетчатой насадкой для скрубберов и градирен // Вестник Технологического университета. – 2025. – Т. 28. – № 4. – С. 76–83.
8. Лаптев А. Г., Лаптева Е. А., Ключкова В. А., Аласгарли С. У. Метод расчета сепарации аэрозольных систем в насадочных скрубберах // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология: материалы VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции. – Казань, 2024. – С. 363–366.
9. Лаптев А. Г., Лаптева Е. А., Аласгарли С. У. Математическая модель и эффективность охлаждения газа в скруббере с барботажными тарелками // Вестник Технологического университета. – 2024. – Т. 27, № 1. – С. 151–158.

10. Аласгарли С. У. Приближенный метод расчета насадочного скруббера мокрой очистки газов от дисперсной фазы // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология: материалы Всероссийского аспирантско-магистерского научного семинара, посвящённого Дню энергетика. – Казань, 2023. – С. 441–444.
11. Аласгарли С. У., Лаптев А. Г. Эффективность контактного теплообмена в пленном слое // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология: материалы VI Всероссийской студенческой научно-технической конференции. – Казань, 2022. – С. 283–286.
12. Аласгарли С. У. Математическая модель охлаждения газа в барботажном слое // Тинчуринские чтения – 2022 «Энергетика и цифровая трансформация»: сборник статей Международной конференции. – Казань, 2022. – С. 692–694.
13. Лаптева Е. А., Лаптев А. Г., Аласгарли С. У. Математическая модель контактного охлаждения газов в высокоскоростных дисперсно-кольцевых потоках // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 12. – С. 44–47.

Подписано в печать 21.10.2025. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать ризографическая.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ № 1810/1.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)  
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92  
e-mail: [westfalika@inbox.ru](mailto:westfalika@inbox.ru)