



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и коммерциализации

Ившин И.В.

2023 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Диссертация «Повышение тепловой эффективности охлаждения воды в пленочной градирне с комбинированными блоками оросителей» выполнена на кафедре «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений».

В период подготовки диссертации соискатель Столярова Екатерина Юрьевна работала в филиале АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1 с июня 2016г. по август 2017г. в должности лаборанта химического анализа, далее и по настоящее время – в должности начальника лаборатории.

Столярова Екатерина Юрьевна с октября 2020г. по июнь 2021г. работала по внешнему совместительству инженером в научной исследовательской лаборатории «Методы моделирования и разработки

энергоэффективных аппаратов очистки и глубокой переработки углеводородного сырья» (НИЛ «ММРЭА») при кафедре «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

В 2017 г. окончила ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по направлению подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника», присуждена квалификация магистр, диплом с отличием № ИТЕ-4834 от 03.06.2017г.

В 2023 г. окончила аспирантуру ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по направлению подготовки «Электро- и теплотехника», где проходила обучение с 01.10.2017г.

Справка о сданных кандидатских экзаменах выдана 04.10.2023г. в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Научный руководитель – канд. техн. наук (05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика), доцент, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «КГЭУ», Лаптева Елена Анатольевна.

По итогам обсуждения диссертации «Повышение тепловой эффективности охлаждения воды в пленочной градирне с комбинированными блоками оросителей» принято следующее заключение:

1. Актуальность

Актуальность исследования определяется необходимостью совершенствования конструкций градирен с целью интенсификации процессов теплообмена, снижения температуры охлаждаемой воды и удельных энергозатрат, а также разработкой математической модели определения эффективности теплообмена в модернизированных градирнях.

2. Связь диссертационной работы с приоритетными научно-исследовательскими работами

Работа направлена на решение задач по повышению энергоэффективности промышленных предприятий и сокращению расходов электрической энергии при производстве продукции и снижению финансовых затрат.

Тема исследований соответствует государственной программе развития химического и нефтехимического комплекса РФ до 2030 года, куда входит нефтегазовое и энергетическое машиностроение. В связи с этим актуальной задачей является моделирование и разработка мини градирни с повышенными нагрузками за счет применения современных высокоэффективных комбинированных контактных устройств. Работа выполнена в рамках научного проекта РНФ 18-79-101-36 «Теоретические методы моделирования и разработки эффективных импортозамещающих аппаратов очистки и глубокой переработки углеводородного сырья на предприятиях топливно-энергетического комплекса» (2018-2023гг.).

3. Научная новизна результатов работы

1. На макете градирни диаметром 0,2 м и высотой 2,0 м с насадками высотой 1,0 м и 1,2 м получены экспериментальные данные по перепаду давлений сухой и орошаемой колонны, объемному коэффициенту массоотдачи и тепловой эффективности охлаждения воды воздухом. Исследованы регулярные насадки из вертикальных пучков полиэтиленовых труб с гладкой и кольцевой дискретно-шероховатой поверхностью, а также при комбинированном расположении поверх слоя хаотичной насадки высотой 0,2 м. Выполнено обобщение результатов эксперимента в виде расчетных эмпирических выражений.

2. Разработана математическая модель для численного решения системы дифференциальных уравнений тепломассообмена с частными производными, записанными в цилиндрической системе координат для градирни с регулярной насадкой при противотоке воздуха и пленки воды. Даны выражения для межфазных источников членов и коэффициентов турбулентного обмена. Математическая модель позволяет учесть неравномерность профиля скорости воздуха на входе и в слое насадки при вычислении профилей температуры воды, энтальпии воздуха и влагосодержания. Также представлена упрощенная двумерная ячеечная модель с учетом неравномерности (неоднородности) распределения фаз.

3. Разработан модифицированный метод единиц переноса с учетом обратного перемешивания потоков воды и воздуха в слое насадки с дополнительными слагаемыми в выражении модели идеального вытеснения. Получено выражение для расчета высоты насадки в градирне при заданной гидравлической и тепловой нагрузки с учетом обратного перемешивания теплоносителей.

4. Разработан алгоритм расчета комбинированной мини градирни с современными регулярными и нерегулярными насадками при повышенных гидравлических нагрузках.

4. Теоретическая и практическая значимость результатов

1. Для проектирования или модернизации пленочных градирен получены обобщенные выражения для расчета гидравлического сопротивления и объемного коэффициента массоотдачи исследованной регулярной трубчатой насадки с кольцевой дискретно-шероховатой поверхностью и в комбинации с хаотичной в интервале нагрузок $w_T = 0,8-2,6$ м/с и $q_{ж} = 8,8-19,4$ м³/(м²ч).

2. Разработаны численная и упрощенная математические модели и алгоритмы расчета тепловой эффективности с учетом неравномерного

профиля скорости воздуха и обратного перемешивания теплоносителей. Установлено, что поперечная неравномерность снижает тепловую эффективность на 5-30 %, а продольная на 10-20 %.

3. Разработан алгоритм расчета высоты пленочной насадки в градирне с учетом обратного перемешивания воды и воздуха.

4. Разработана и запатентована конструкция мини градирни с повышенной гидравлической нагрузкой (до $40 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$) и скоростью воздуха до 2,8 м/с. Показано снижение удельных затрат на охлаждение воды.

5. Зарегистрирована программа для ЭВМ расчета пленочной градирни.

6. Результаты работы приняты к внедрению на филиале АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1 и ООО «ИВЦ «Инжехим» г. Казань.

7. Полученные в диссертации экспериментальные данные по гидравлическим и тепломассообменным характеристикам насадок при пленочном режиме, а также математическая модель могут применяться в расчетах насадочных скрубберов охладителей газов, а также абсорберов для извлечения легкорастворимых газов в различных областях промышленности.

5. Личное участие авторов в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации

Автором была поставлена задача исследования тепловой эффективности охлаждения воды в регулярных насадках с интенсификаторами и в комбинированных насадках. Получены экспериментальные данные на лабораторном макете градирни с блоком регулярных и комбинированных оросителей. Разработана численная математическая модель на основе решения системы дифференциальных уравнений тепломассообмена с частными производными для градирни с регулярной насадкой при противотоке воздуха и пленки воды. Разработан модифицированный метод единиц переноса с учетом обратного перемешивания потоков воды и воздуха в слое насадки с дополнительными

слагаемыми в выражении модели идеального вытеснения. Автором разработана и запатентована полезная модель мини градирни с насадками (Пат. №175714). Разработан алгоритм расчета комбинированной мини градирни. Зарегистрирована программа для ЭВМ расчета пленочной градирни.

6. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность и обоснованность результатов работы обусловлены: современными средствами сбора и обработки экспериментальных данных на макете градирни; согласование с исследованиями других авторов и результатами математического моделирования; использованием фундаментальных законов сохранения в дифференциальной форме, а также апробированиях моделей гидродинамической структуры потоков в аппаратах.

7. Соответствие диссертации научной специальности

По тематике и методам исследования диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.6 пп 5,6,8,9.

п.5,6. Процессы переноса массы, импульса и энергии при свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей и характеристик теплопередающих поверхностей, в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях.

п.8,9. Научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты.

8. Полнота изложения результатов диссертации в работах, опубликованных автором

По результатам диссертационного исследования опубликовано 15 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах, входящие в перечень ВАК Минобрнауки России, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных цитирования Scopus.

Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ

1. Lapteva E.A., **Stolyarova E.Y.**, Laptev A.G. Thermohydraulic of the process of cooling of water in miniature cooling towers with regular packing// Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Т. 54. № 3-4. С. 161-164.

2. Lapteva E.A., **Stolyarova E.Yu.**, Laptev A.G. Numerical estimation oh the heat and mass transfer efficiency considering nonuniformity in water and air distribution// Thermal Engineering. 2020. Т. 67. № 4. С. 234.

3. Лаптева Е.А., **Столярова Е.Ю.** Снижение энергозатрат на охлаждение воды с применением мини градирен// Труды Академэнерго. 2020. № 2 (59). С. 23-30.

4. Лаптева Е.А., **Столярова Е.Ю.**, Лаптев А.Г. Патент 175714 Мини градирня. Дата подачи заявки: 10.04.2017. Опубликовано 15.12.2017. Бюл. № 35.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616879 Российская Федерация. Расчет высоты блоков оросителей градирни : № 2021615841 : заявл. 22.04.2021 : опубл. 28.04.2021 / А. Г. Лаптев, Е. А. Лаптева, **Е. Ю. Столярова** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет». – EDN KHIDNV.

Прочие публикации, входящие в РИНЦ

6. **Столярова Е.Ю.**, Лаптева Е.А., Лаптев А.Г. Экспериментальные гидравлические и тепломассообменные характеристики пленочной градирни с комбинированными насадками // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. №1 (57). С. 37-47.

7. Лаптева Е.А., Лаптев А.Г., **Столярова Е.Ю.** Трение в восходящем газожидкостном потоке в канале с хаотичной насадкой// Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2017. №1-2. С. 170-173.

8. Лаптева Е.А., **Столярова Е.Ю.**, Лаптев А.Г. Модель структуры потока и эффективность пленочной градирни с учетом неравномерности распределения фаз// Фундаментальные исследования. 2018. № 11-2. С. 150-154.

9. Лаптева Е.А., Лаптев А.Г., **Столярова Е.Ю.** Энергетические характеристики пленочных градирен. Результаты современных научных исследования и разработок// Сборник статей победителей Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией Г.Ю. Гуляева. 2017 Издательство: "Наука и Просвещение" (Пенза) – С. 46-51.

10. Лаптева Е.А., **Столярова Е.Ю.** Исследование процессов тепломассобмена в мини градирне //Сборник статей Тинчуринские чтения - 2021 «Энергетика и цифровая трансформация». Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах. Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Казань, 2021. С. 240-243.

11. Лаптева Е.А., **Столярова Е.Ю.** Исследование тепловой эффективности охлаждения воды в распыливающем аппарате// VIII Национальная научно-практическая конференция с международным участием. Моделирование энергоинформационных процессов. – г. Воронеж. – 2020. – С. 281-283.

12. Лаптева Е.А., **Столярова Е.Ю.** Метод числа единиц переноса расчета охлаждения воды в пленочных контактных устройствах градирни// Материалы докладов III Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» с. 146, 13-15 декабря 2017 г.

13. Лаптева Е.А., **Столярова Е.Ю.** Эффективность охлаждения воды в мине-градирне с дискретно-шероховатой регулярной насадкой VI Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», 2021, 124-125.

14. Лаптева Е.А., **Столярова Е.Ю.**, Лаптев А.Г. Повышение эффективности охлаждения воды в градирнях с комбинированными блоками оросителей Международная научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» 7-9 декабря 2022г. Е.А. Лаптева, Е.Ю. Столярова, А.Г. Лаптев г. Казань.

15. **Столярова, Е. Ю.** Экспериментальное исследование насадок на макете мини-градирни / XXVI Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика : материалы докладов : в 3 т., Казань, 06–07 декабря 2022 года. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 149-152.

9. Апробация работы

По теме диссертационной работы опубликовано 15 работ, 5 – из списка рекомендованного ВАК, из них 2 – входящие в базу Scopus; 1 патент на полезную модель, 1 свидетельство о регистрации программ для ЭВМ. Отдельные разделы диссертации докладывались и обсуждались на Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ), г. Казань, 2020, III Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», г. Казань, 2017, Результаты современных научных исследования и

разработок Международная научно-практическая конференция "Наука и Просвещение", г. Пенза, 2017, IV Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», г. Казань, 2018, Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Моделирование энергоинформационных процессов», г. Воронеж, 2020, VII Международной научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», 2022г., VI Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», 2021, а также на семинарах и конференциях КГЭУ (2017-2023 гг.).

10. Ценность научных работ соискателя

Ценность научных работ соискателя состоит в следующем:

1. В результате экспериментов получены данные по гидравлическому сопротивлению блоков оросителей градирни, объемному коэффициенту массоотдачи, тепловой эффективности по газовой и жидкой фазам. Получены эмпирические выражения для коэффициентов гидравлического сопротивления и объемного коэффициента массоотдачи.

2. Решена задача численного исследования профилей температур воды и воздуха и тепловой эффективности градирни при неоднородном распределении фаз, в основном при неравномерном профиле скорости воздуха на входе в блок оросителей (насадку). Предложены научно-технические решения по снижению неравномерностей и повышению тепловой эффективности.

3. Получено выражение для расчета тепловой эффективности охлаждения воды с учетом гидродинамической структуры потоков. В результате повышается точность расчетов градирни.

4. Разработана конструкция мини градирни с комбинированной насадкой. Установлено, что замена промышленной градирни СК-400 на три

мини градирни позволяет снизить энергозатраты на охлаждение воды на 40кВт или 128800 кВт в год.

11.Характер результатов

Характер результатов соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней ВАК Министерства образования и науки РФ.

12.Рекомендации и выводы

Диссертационная работа Столяровой Екатерины Юрьевны "Повышение тепловой эффективности охлаждения воды в пленочной градирне с комбинированными блоками оросителей" является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой содержится решение задач, связанных с повышением тепловой эффективности охлаждения воды в градирне при противоточном пленочном движении фаз с учетом неоднородностей профиля скорости воздуха в комбинированных насадках.

Диссертационная работа обобщает самостоятельные исследования автора, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые на защиту, свидетельствует о личном вкладе автора в науку. При выполнении диссертационной работы Столяровой Е.Ю. проявила себя зрелым научным работником, способным ставить и решать сложные теоретические и практические задачи.

Работа соответствует критериям Положения о присуждения ученых степеней, принятого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г № 842, с изменениями, принятыми Постановлением Правительства РФ от 26 сентября 2022г, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертационная работа «Повышение тепловой эффективности охлаждения воды в пленочной градирне с комбинированными блоками оросителей» Столяровой Екатерины Юрьевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. - Теоретическая и прикладная теплотехника.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «КГЭУ», которое состоялось 26 июня 2023г. протокол № 5. На заседании присутствовало 15 человек, из них 7 докторов наук. Результаты голосования: «за» - 15, «против» - нет, «воздержалось» - нет.

Председатель заседания:

Ильин Владимир Кузьмич

д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «КГЭУ»,

Секретарь заседания:

Власова Маргарита Андреевна

инженер кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «КГЭУ»

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

420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.

Тел. (843)519-4321, e-mail: ee-kgeu@mail.ru

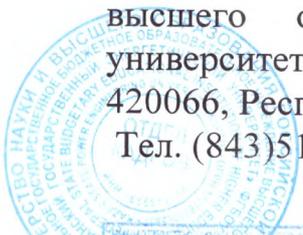
Сведение о лице, утвердившем заключение

Ившин Игорь Владимирович: доктор технических наук, профессор

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», проректор по науке и коммерциализации,

420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.

Тел. (843)519-42-73, e-mail: ivshini@mail.ru



Ившин И.В. Власовой М.А.
Подпись: Ившин И.В.
Специалист ОК: Абдирахманова О.А.