

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВО «Ивановский  
государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина»,  
д-р техн. наук, профессор  
Тютиков Владимир Валентинович



«06» марта 2024 г.

## ОТЗЫВ

### ведущей организации

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» на диссертацию Столяровой Екатерины Юрьевны «Повышение тепловой эффективности охлаждения воды в пленочной градирне с комбинированными блоками оросителей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника»

### Актуальность работы

В технологическом цикле промышленных предприятий применяется различное оборудование (конденсаторы, теплообменники и т.д.), в котором обязательным условием для обеспечения его работоспособности является охлаждение теплоносителей за счет отвода от них теплоты. Для этого широко используются оборотные системы охлаждения с градирнями. Башенные градирни характеризуются большими габаритами, высокими капитальными затратами, значительными расходами используемой воды, повышенными потерями при каплеуносе и т.д. Актуальными являются исследования в области разработки новых видов конструкций охлаждающего оборудования, отвечающих всем

предъявляемым требованиям к системам оборотного охлаждения, и при меньших габаритах и сниженных затратах, а также увеличивающих эффективность охлаждения воды и способствующих снижению протяженности тракта от градирни к источнику охлаждения.

Актуальной задачей является поиск способов модернизаций градирен, внесение изменений в их конструкцию, в том числе за счет применения современных высокоэффективных комбинированных контактных устройств, с целью оптимизации процессов теплообмена.

**Целью диссертационного исследования** является получение экспериментальных данных по теплообмену и гидравлическому сопротивлению с разработкой математической модели тепловой эффективности охлаждения воды в градирне при противоточном пленочном движении фаз с учетом неоднородностей профиля воздуха в блоках оросителей.

### **Общая характеристика работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка используемых источников из 154 наименований. Текст диссертации изложен на 193 страницах машинописного текста, содержит 66 рисунков, 20 таблиц и 3 приложения.

**В первой главе** приведен обзор научно-технических публикаций по охлаждению оборотной воды в градирнях. Представлен краткий анализ конструкций малогабаритных градирен выпускаемых отечественной промышленностью, а также применяемых в них полимерных оросителей. Рассмотрены научные исследования в области модернизации контактных устройств и математического моделирования теплообмена в градирнях. В результате проведенного анализа конструкций, предназначенных для охлаждения воды, выделены основные их недостатки: сложность в изготовлении, высокие капитальные затраты при производстве и эксплуатации, недостаточная удельная производительность, повышенные потери с каплеуносом, увеличенные расходы свежей воды для поддержания заданных технологических параметров.

**Во второй главе** приведены математические модели для теплообменных процессов в пленочных аппаратах колонного типа, к которым

относятся градирни. Представлена математическая модель процесса теплообмена в противоточной пленочной вентиляторной градирне с учетом возможных неравномерностей распределения потоков воды и воздуха. Даны результаты расчетов эффективности теплообмена и сравнение с экспериментальными данными полученными на физическом макете градирни. Приведена модель гидродинамической структуры потока для учета эффективности пленочной градирни с учетом неравномерности распределения фаз. Выполнена модификация метода единиц переноса для расчета охлаждения воды в пленочных контактных устройствах градирни с учетом обратного перемешивания теплоносителей. Получено выражение для расчета тепловой эффективности в газовой фазе градирни с учетом гидродинамической структуры потоков теплоносителей. Отмечено, что неравномерности распределения газовой и жидкой фаз могут снижать тепловую эффективность на 5-30%. Даны технические решения для снижения этих неравномерностей.

**В третьей главе** представлено описание экспериментальной установки, разработанной при участии автора и установленной в лаборатории КГЭУ, приведены результаты исследования регулярных и комбинированных насадок в пленочной градирне в виде таблиц и графиков зависимостей от скорости газа и плотности орошения. Приведены параметры насадочного слоя, который применялся в качестве блока оросителя для градирни, а также дано обоснование применения исследуемых материалов и форм для насадок градирни. На основе измеренных в ходе эксперимента гидравлических и термодинамических параметров охлаждения воды выполнено обобщение результатов по гидравлическим и теплообменным характеристикам регулярного и комбинированного насадочного слоя при проведении процесса охлаждения воды воздухом на макете пленочной градирни. Приведены полученные зависимости для гидравлического сопротивления исследуемых сухих и орошаемых насадок. Дано сравнение коэффициентов массоотдачи, полученных экспериментально, с коэффициентами массоотдачи, рассчитанными по математическим моделям и экспериментами других авторов. Выполнен сравнительный анализ уравнений различных авторов для числа Шервуда в газовой фазе с полученными

экспериментальными данными для регулярных насадок. Результаты экспериментов удовлетворительно согласуются с расчетами.

Сделаны выводы по полученным графическим зависимостям объемного коэффициента массоотдачи и тепловой эффективности по жидкой и газовой фазам.

**В четвертой главе** рассмотрено применение в мини-градирне металлической регулярной гофрированной насадки, которая успешно внедряется на предприятиях РФ. Представлена разработанная и запатентованная конструкция мини градирни с комбинированными насадками, рассмотрено применение мини градирни с рулонной гофрированной насадкой в качестве замены крупномасштабных промышленных градирен на нефтехимических предприятиях. Показано, что мини градирни обеспечивают повышение гидравлической нагрузки и эффективности охлаждения оборотной воды.

Приведены результаты расчета, техническим результатом которого является обоснование возможности замены промышленной градирни СК-400, эксплуатируемой на предприятии АО «Казаньоргсинтез», на несколько мини градирен с высокими удельными нагрузками и снижением энергозатрат. Из данных промышленной эксплуатации и результатов выполненных расчетов следует, что крупногабаритная градирня СК-400 малоэффективна по сравнению с мини градирней. С применением мини градирен снижаются энергозатраты на подачу воздуха на 40%. Даны сводные гидравлические и тепловые характеристики охлаждения воды в мини градирне с регулярной рулонной насадкой с шероховатой поверхностью «Инжехим». Обоснованы преимущества применения мини градирен с современными регулярными насадками. Показана возможность применения метода единиц переноса с учетом обратного перемешивания потоков для определения тепловой эффективности охлаждения воды в противоточной пленочной градирне.

**В заключении** изложены основные результаты диссертационной работы.

Из диссертационной работы следует, что автором проведен большой объем экспериментальных исследований по определению тепломассообменных характеристик различных насадок пленочной градирни, что, безусловно, является преимуществом данной работы. На основе теоретического анализа решена задача

численного исследования профилей температур воды и воздуха и тепловой эффективности градирни при неоднородном распределении фаз.

Преимуществом данной работы является аналитическая форма полученных выражений для расчета эффективности теплообменных процессов, а также наглядная форма представления научно-технических результатов по импортозамещающей модернизации аппаратов и установок в промышленности.

Основные результаты диссертационного исследования раскрыты в опубликованных работах, доложены на международных научно-технических конференциях.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и отражает ее научную новизну, научные и практические результаты.

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

Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы и достоверны, что обеспечено применением современных средств сбора и обработки экспериментальных данных на макете градирни; согласованностью с исследованиями других авторов и результатами математического моделирования; использованием фундаментальных законов сохранения в дифференциальной форме, корректностью принятых допущений, а также использованием апробированных моделей гидродинамической структуры потоков в аппаратах.

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

Основное содержание диссертации отражено в 15 работах, в том числе в 5 статьях в рецензируемых журналах из списка рекомендованного ВАК, из них 2 – входящие в базу Scopus. Получено 1 патент на полезную модель и 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

## **Значимость результатов работы для развития соответствующей отрасли науки, научная новизна**

**Научная новизна** исследований заключается в следующем:

1. Получены экспериментальные данные, и расчетные эмпирические выражения по перепаду давлений сухой и орошаемой колонны, объёмному коэффициенту массоотдачи и тепловой эффективности охлаждения воды воздухом с использованием различных видов регулярных и комбинированных насадок.

2. Разработана математическая модель для численного решения системы дифференциальных уравнений тепломассообмена для градирни с регулярной насадкой при противотоке воздуха и воды, а также упрощенная двумерная ячеечная математическая модель, позволяющая учесть гидромеханические неоднородности потоков.

3. Разработан модифицированный метод единиц переноса с учетом обратного перемешивания потоков воды и воздуха в слое насадки с дополнительными составляющими (слагаемыми) в модели идеального вытеснения.

4. Для комбинированной мини градирен, эксплуатируемых в интервале повышенных гидравлических нагрузок, разработан алгоритм расчета, позволяющий выполнить математическое описание эффективности процесса тепломассообмена с различными современными оросителями.

**Практическая значимость** работы подтверждена в организациях, специализирующихся на изучении и эксплуатации тепломассообменного оборудования, в котором происходит охлаждение воды (филиал АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1, ООО ИВЦ «Инжехим»), где разработанные математические модели и конструкция мини градирни с насадками приняты к внедрению.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке и обосновании математических моделей и алгоритмов расчета, позволяющих учесть неравномерность распределения фаз при проектировании и модернизации тепломассообменного оборудования, а также определить требуемую высоту блока оросителя.

## **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника» в части направлений исследований – пункту 4: «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. ...» и пункту 5: «Научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена ...».

## **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Полученные в рамках диссертационного исследования научно-технические результаты рекомендуется использовать на предприятиях энергетики, химии, нефтехимии и нефтепереработки (например, в АО «Татэнерго», АО «Нижнекамскнефтехим», ПАО «Т Плюс» и др.), а также в проектных организациях, инжиниринговых компаниях и в учебном процессе при подготовке специалистов теплоэнергетических профилей.

## **Вопросы и замечания по диссертационной работе**

1. В полезной модели мини градирни устранены недостатки ее прототипа, в частности, неравномерность подачи исходной воды на блок оросителя. В экспериментальной установке этот недостаток имеется. Почему при разработке экспериментальной установки не учтена данная особенность?

2. Практическая часть работы автора выполнена на экспериментальной установке. Имеются результаты оценки погрешности экспериментальных данных, однако недостаточно полно приведен учет погрешности тепловых потерь через стенку колонны в атмосферу.

3. В работе автором выполнен сравнительный анализ градирни СК-400 и мини градирни с насадками на предмет замены крупномасштабной градирни. В качестве критерия экономичности выбираются эффективность градирни, ее габариты и

затраты на электрическую энергию. Желателен более полный экономический расчет.

4. В данной работе автор исследует различные пленочные оросители на предмет их тепловой эффективности для применения в мини градирнях. А возможно ли использовать эти насадки в крупномасштабных градирнях?

5. На стр. 10 диссертации имеется опечатка в записи формулы по расчету критерия Нуссельта – « $Nu = \alpha \lambda / l$ ».

### **Заключение**

При общей положительной оценке работы следует отметить большой объем экспериментальных исследований и новизну математических моделей и алгоритмов определения тепловой эффективности градирен. Приведенные выше замечания не снижают научной значимости и практической ценности работы, а имеющиеся недочеты имеют частный характер.

Диссертационная работа Столяровой Екатерины Юрьевны «Повышение тепловой эффективности охлаждения воды в пленочной градирне с комбинированными блоками оросителей» соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрауки России, установленным в пп.9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней (Постановления Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (актуальной редакции)), а её автор Столярова Екатерина Юрьевна заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника».



Диссертационная работа Столяровой Екатерины Юрьевны и отзыв на нее  
обсуждены на заседании кафедры «Теоретические основы теплотехники» ФГБОУ  
ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.  
Ленина», 5 марта 2024 год, протокол №7.

Директор

УМЦ ИГЭУ «Энергосбережение»

доктор технических наук, профессор кафедры

«Теоретические основы теплотехники»

ФГБОУ ВО «ИГЭУ»

е-mail: buhmirov@tot.ispu.ru, Тел: +7(4932) 269-778

Бухмиров

Вячеслав Викторович

Зав. кафедрой

«Теоретические основы теплотехники»

ФГБОУ ВО «ИГЭУ»

доктор технических наук, доцент

е-mail: zavkaf@tot.ispu.ru, Тел.: +7(4932) 269-778

Бушуев

Евгений Николаевич

Адрес ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»: Российская Федерация, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская,  
д. 34

Телефон: +7(4932) 269-999, факс: +7(4932) 385-701

е-mail: office@ispu.ru, сайт: http://ispu.ru

Подписи В.В. Бухмирова и Е.Н. Бушуева заверяю:

Секретарь ученого совета ФГБОУ ВО ИГЭУ

к.э.н., доцент

06.03.2024г.



Вылгина

Юлия Вадимовна