

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Столяровой Екатерины Юрьевны на тему «Повышение тепловой эффективности 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 темы исследования**

Актуальность работы определена развитием математического моделирования явлений переноса в системах газ-жидкость и необходимостью увеличения тепловой эффективности имеющихся в промышленности и вновь создаваемых градирен путем модернизации блоков оросителей без существенных капитальных затрат.

Известные математические модели расчета градирен, несмотря на их широкое применение, имеют ряд недостатков, связанных с их сложностью, трудоемкостью и требующие больших временных затрат и кроме этого, не учитывается неоднородности распределения фаз.

Актуальность темы обусловлена применением фундаментальных законов сохранения и получением относительно простых выражений для расчёта требуемой высоты блока оросителей и оценки их тепломассообменных и энергетических характеристик.

Несомненно, диссертационная работа Столяровой Е.Ю., значительная часть которой посвящена развитию методов приближенного математического моделирования тепломассообменных процессов в двухфазных средах, а также получением экспериментальных данных применительно к новым контактным устройствам в пленочных блоках оросителей градирни является актуальной.

Следует отметить, что тема исследований соответствует государственной программе развития химического и нефтехимического комплекса РФ до 2030 года.

## **Оценка содержания диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения.

**Во введении** сформулирована актуальность темы научного исследования. Указана степень проработанности проблемы и определяет дальнейшие направления ее решения.

Цель и задачи исследования сформулированы достаточно четко и подробно. Охарактеризована научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы. Отмечен личный вклад автора в диссертационном исследовании. Приведен перечень конференций и семинаров, где докладывались отдельные разделы диссертации.

**В первой главе** рассмотрены различные конструкции аппаратов для контактного охлаждения воды в промышленности, выполнен анализ полимерных оросителей (регулярных насадок), предназначенных для увеличения тепловой эффективности охлаждения воды и являющихся альтернативой деревянным, металлическим и другим оросителям. Кратко анализируются методы экспериментальных и теоретических исследований процессов теплообмена в градирнях, приведены результаты экспериментов других авторов.

**Во второй главе** представлены математические модели для тепло – массообменных процессов в пленочных аппаратах колонного типа. Разработана математическая модель процесса тепло- и массообмена в противоточной пленочной вентиляторной градирне с учетом неравномерностей (неоднородностей) распределения потоков воды и воздуха. Даны результаты расчетов эффективности теплообмена и сравнение с экспериментом. 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.

**В третьей главе** получены экспериментальные данные и выполнено обобщение результатов по гидравлическим и тепломассообменным характеристикам регулярного и комбинированного насадочного слоя при проведении процесса охлаждения воды воздухом на макете пленочной градирни, диаметром 0,2 м и высотой 2 м.

На основе полученных выражений для коэффициентов тепло - и массоотдачи с учетом их корректировки получены выражения для расчета чисел Нуссельта и Шервуда для различных контактных устройств. Приводятся графические зависимости для сравнения с известными экспериментами данными (пленочные и насадочные аппараты при различных гидродинамических режимах).

**В четвертой главе** представлена разработанная и запатентованная конструкция мини градирни с комбинированными насадками (блоки оросителей), рассмотрено применение мини градирни с рулонной гофрированной металлической насадкой в качестве альтернативы крупномасштабным вентиляторным промышленным градирням. Показано, что мини градирни обеспечивают повышение гидравлической нагрузки и тепловой эффективности охлаждения оборотной воды. Рассмотрена замена крупномасштабной градирни диаметром 20 метров (СК-400), на три мини градирен с высокими удельными нагрузками, что обеспечивает снижение энергозатрат на охлаждение воды.

**Научную новизну** работы составляет развитие методов математического моделирования тепломассообменных процессов в системе газ-жидкость при решении задач замены устаревших контактных устройств в градирнях на современные, высокоэффективные.

В соответствии с поставленной целью и задачами в диссертационной работе выполнена серия экспериментов по исследованию процесса

охлаждения воды воздухом при пленочном противотоке фаз в регулярных и комбинированных насадках (блоках оросителей) на макете градирни. Также разработаны численная и упрощенная математические модели тепломассообмена для блока оросителей с учетом неоднородности распределения фаз и разработана конструкция мини градирни с комбинированными насадками, характеризующаяся повышенной тепловой эффективностью охлаждения воды и увеличенной гидравлической нагрузкой.

В результате в диссертации получены пять выражений для расчёта коэффициента гидравлического сопротивления различных контактных устройств; выражение для определения требуемой высоты блока оросителя и выражение для расчета тепловой эффективности в газовой фазе градирни с учетом гидродинамической структуры потоков теплоносителей. Показано влияние структуры потоков газа и жидкости на эффективность охлаждения воды.

**Теоретическая и практическая значимость** диссертации состоит в получении приближенных математических моделей, которые сведены к относительно простым и надёжным выражениям для расчёта эффективности процессов тепло и массоотдачи. Также практическая значимость заключается в замене промышленной градирни СК-400 с полиэтиленовой сетчатой насадкой из цилиндров диаметром 50 мм и с высотой блоков  $H=1,8$  м на АО «Казаньоргсинтез» на три мини градирни с комбинированными блоками оросителей, при этом энергозатраты на подачу воздуха и воды с применением мини градирен снижаются на 40%.

Кроме этого практической значимостью являются запатентованная автором конструкция мини градирни с комбинированными насадками и программа ЭВМ для расчета пленочной градирни.

Необходимо особо отметить направленность диссертационной работы на импортозамещение контактных устройств тепломассообменных аппаратов пленочного типа с энергосберегающим эффектом.



**Обоснованность и достоверность** выполненных исследований и полученных расчетных выражений подтверждается сравнением с результатами исследований различных авторов для процессов теплообмена в двухфазных средах.

Теоретическая основа построения математических моделей не вызывает сомнений, так как использованы апробированные модели гидродинамической структуры потоков и теория пограничного слоя.

#### **Апробация работы:**

Полнота изложения материалов диссертации достаточно высокая, по теме исследования опубликовано большое количество печатных работ - 15, в том числе 5 статей в рекомендованных ВАК журналах, из них 2 статьи в журналах, цитируемых в системах в Scopus и WoS, а также 1 патент на изобретение и 1 свидетельство регистрации программы для ЭВМ. Апробация работы проведена в 1 вестнике энергетического университета и на 7 международных и всероссийских конференциях.

**Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника»** по следующим направлениям: 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; научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты.

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

Автореферат и публикации отражают основное содержание диссертации.

Считаю, что цель и все поставленные в работе задачи решены в полном объеме и на высоком научном уровне. Работа широко апробирована. Но к работе есть ряд пожеланий и замечаний.

## Замечания

1. В конце Главы 1 нет критического анализа существующих градирен с точки зрения их эксплуатации и методов расчета миниградирен, с выявлением проблем, недостатков и несовершенства. С самого начала нет установки на актуальность и востребованность совершенствования конструкций существующих малых градирен и модернизации методики их расчета. Т.е. первоначально не понятно, зачем нужна данная работа? Хотя отмечу, что частично это выясняется по ходу чтения диссертации.

2. Обзор в Главе 1 в основном выполнен по конструкциям и методам экспериментального исследования градирен различных авторов. Однако анализа существующих методов расчета (на чем строятся, что учитывают, допущения, основные расчетные зависимости, недостатки ...), в том числе на основе численных методов, нет.

3. Полученные в работе результаты позиционируются как данные для оценки эффективности малогабаритных градирен (миниградирен). Что такое малогабаритная градирня, чем лимитируется такая их классификация? Применимы полученные результаты для малогабаритных градирен к градирням большей мощности?

4. Как задается неравномерность распределения фаз? А конкретно - для потока воздуха параметр  $w_r(r)/w_{гр}$  – зависимость, графы, таблично? В уравнениях видно, что задается и распределение разбрызгивания капель воды  $w_{ж}(r)/w_{жгр}$ . Как – зависимость, графы, таблично? Или как написано по тексту – что неравномерность потока воды не учитывалась. Однако в работах А.Н. Павленко для ректификационных колонных аппаратов с разбрызгивателя экспериментально показано, что неравномерность орошения существует и оказывает влияние на процесс.

5. В чем отличительная особенность новой математической модели и далее методики? Подобные модели уже существовали, тогда что не устроило автора в них? Чья базовая модель? Что дал переход в расчетах на новую



модель? Конкретно – на сколько % повысилась точность прогнозирования параметров градирен?

6. Из описания экспериментальной установки не ясно, проводилась ли оценка неравномерности потока воды и воздуха, в том числе и распределения параметров потоков (расходов, температур, давлений) по высоте градирни, т.е. эксперименты проведены только для равномерного по поперечному сечению распределению потока, о чем говорят таблицы 3.2-3.4? Было ли сравнение экспериментальных данных по влиянию неравномерности потока воздуха с расчетными данными или эксперимент только для равномерного распределения скорости воздушного потока? Тогда как верифицировалась модернизированная модель и методика расчета?

Формулы 3.1 и 3.2 показывают, что измерялись параметры по высоте градирни (после хаотической насадки и после регулярной) с дальнейшим определением объемных осредненных параметров. Однако схема экспериментальной установки не показывает измерения локальных параметров.

7. К сожалению разделы Выводы и Заключение находятся по тексту, не выделены нумерацией разделов. Имеются опечатки по тексту.

Все изложенные пожелания и замечания носят рекомендательный характер и не снижают научной и практической значимости полученных автором результатов работы.

### **Заключение**

В целом, диссертационная работа Столяровой Екатерины Юрьевны представляет собой законченное научное исследование, выполненное автором самостоятельно и на высоком уровне. В диссертационной работе разработаны положения математической модели для оценки тепловой эффективности охлаждения воды в малогабаритных градирнях при противоточном пленочном движении фаз с учетом неоднородности профиля скорости воздуха в комбинированных насадках. Внедрение методики расчета, разработанной на основе представленной математической модели с

учетом неоднородности профиля скорости воздуха вносит значительный вклад в создание высокоэффективных систем охлаждения воды в системах оборотного водоснабжения объектов энергетики и энергоемких предприятий промышленности.

Считаю, что диссертационная работа «Повышение тепловой эффективности воды в пленочной градирне с комбинированными блоками оросителей» соответствует требованиям п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 (в редакции от 18.03.2023), а ее автор, Столяровой Екатерины Юрьевны, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 - Теоретическая и прикладная теплотехника.

Попов Игорь Александрович  
доктор технических наук по специальности  
01.04.14, профессор,  
член-корреспондент АН РТ,  
профессор кафедры теплотехники и  
энергетического машиностроения,  
Рабочий адрес: 420111, г. Казань, ул. К.  
Маркса, 10 Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки «Казанский  
национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н.Туполева – КАИ»,  
Рабочий телефон: тел. 8 (843) 231-55-50  
Адрес электронной почты:  
popov-igor-alex@yandex.ru



13.02.2024

Я, Попов Игорь Александрович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Столяровой Екатерины Юрьевны, и их дальнейшую обработку.

Подпись Попов И.А.  
заверяю. Начальник управления  
делопроизводства и контроля

