

*На правах рукописи*



**Столярова Екатерина Юрьевна**

**ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ  
В ПЛЕНОЧНОЙ ГРАДИРНЕ С КОМБИНИРОВАННЫМИ  
БЛОКАМИ ОРОСИТЕЛЕЙ**

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

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

**Казань - 2024**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений».

**Научный руководитель -**

кандидат технических наук, доцент  
**Лаптева Елена Анатольевна**

**Официальные оппоненты:**

**Попов Игорь Александрович**, доктор технических наук, член-корреспондент АН РТ, профессор кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»

**Сидягин Андрей Ананьевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологическое оборудование и транспортные системы» Дзержинский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева»

**Ведущая организация -**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново

Защита диссертации состоится 11 апреля 2024 года 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.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные 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 «\_\_»\_\_\_\_\_ 2024 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета

**Борисова Светлана Дмитриевна**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования** определяется необходимостью совершенствования конструкций градирен с целью интенсификации процессов теплообмена, снижения температуры охлаждаемой воды и удельных энергозатрат. 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» (2018–2023 гг.).

**Степень проработанности проблемы.** В развитии теории и практики теплообмена в градирнях особый вклад внесли Ф. Меркель, Б.В. Проскураков, И. Лихтенштейн, Б.С. Фарворский, Т.С. Ямпольский, Берман Л.Д., Аверкиев А.Г., Арефьев Ю.И., Пономаренко В.С. и другие. Исследованием процессов в градирнях, разработкой методов их расчета и совершенствованием конструкций также занимались А.Б. Голованчиков, В. А. Балашов, А.С. Пушнов, М.Г. Лагуткин, А.Г. Лаптев, С.П. Иванов, Н.А. Меренцов, С.А. Горбачев, В.Л. Федяев, А.В. Дмитриев, А.И. Бадриев, К. Х. Гильфанов, В.Н. Шарифуллин, К.Е. Бондарь и многие другие. Однако на сегодняшний день недостаточно полно разработаны математические модели с учетом неравномерности распределения воды и воздуха, обратного перемешивания теплоносителей, а также конструкции мини градирен с отечественными высокоэффективными насадками.

**Цель исследования:** получение экспериментальных данных и разработка математической модели тепловой эффективности охлаждения воды в градирне при противоточном пленочном движении фаз с учетом неоднородностей профиля скорости воздуха в комбинированных насадках.

### **Задачи исследования:**

1. Получение экспериментальных данных на макете градирни по гидравлическому сопротивлению, объемному коэффициенту массоотдачи и тепловой эффективности охлаждения воды в регулярных и комбинированных насадках с интенсификаторами.
2. На основе решения составленной системы дифференциальных уравнений теплообмена с частными производными численное моделирование теплообмена в пленочной насадке с учетом неравномерного профиля скорости воздуха и воды.
3. Разработка упрощенной математической модели для расчета высоты блока насадки с учетом обратного перемешивания теплоносителей.
4. Разработка конструкции мини градирни с комбинированными блоками оросителей, расчет эффективности теплообмена и энергетических затрат на охлаждение воды.

### **Научная новизна:**

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 теплообмена 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 профилей скорости воздуха и воды 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 нагрузках с учетом обратного перемешивания теплоносителей.

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

**Объекты исследования:** теплообмен в пленочных контактных устройствах и конструкция мини градирни с комбинированными насадками.

**Теоретическая и практическая значимость:**

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  $q_{ж} = 8,8-19,4$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>час).

2. Разработаны численная и упрощенная математические модели и алгоритмы расчета тепловой эффективности с учетом неравномерных профилей скорости воздуха и воды и обратного перемешивания теплоносителей. Установлено, что поперечная неравномерность снижает тепловую эффективность на 5–30 %, а продольная – на 10–20 %.

3. Разработан алгоритм расчета тепловой эффективности и 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 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>час)) и скоростью воздуха до 2,8 м/с. Показано снижение удельных затрат на охлаждение воды.

5. Зарегистрирована программа для ЭВМ расчета пленочной градирни.

**Методы исследования поставленных задач:**

Методы исследований заключаются в планировании эксперимента и обработке данных, применении теории математического моделирования теплообмена и моделей гидродинамической структуры потоков.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена современными средствами сбора и обработки экспериментальных данных на макете градирни; согласованием с исследованиями других авторов и результатами математического моделирования; использованием фундаментальных законов сохранения в дифференциальной форме, а также апробированием моделей гидродинамической структуры потоков в аппаратах.

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

1. Разработанной математической модели теплообмена в пленочных блоках оросителей градирен с учетом неоднородности потоков;

2. Разработанной конструкции мини градирни с насадками;

3. Результатах экспериментальных исследований гидравлических и теплообменных характеристик макета мини градирни. Обобщение опытных данных в виде расчетных выражений;

4. Разработанном алгоритме расчета тепловой эффективности комбинированной мини градирни с современными регулярными и нерегулярными насадками при повышенных гидравлических нагрузках.

**Апробация работы и публикации:**

По теме диссертационной работы опубликовано 15 работ, из них 2 статьи в рецензируемом научном издании, индексируемом в международной базе данных Scopus, 5 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 1 патент на полезную

модель. 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.).

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

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

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»;

6 – «Научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты».

**Личный вклад соискателя** состоит в непосредственном участии во всех этапах получения результатов, представленных в диссертации, в разработке конструкции мини градирни, работающей при повышенных гидравлических нагрузках, в разработке математической модели, позволяющей учесть неравномерность распределения жидкой и газовой фаз, в самостоятельном проведении экспериментов на экспериментальной установке, обработке результатов эксперимента в виде расчетных эмпирических выражений, разработке программы для ЭВМ для расчета высоты оросителей, 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, четырех глав, заключения, приложений и содержит 194 страницы машинописного текста, включает 66 рисунков, 20 таблиц. Список литературы из 154 источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** приведен обзор публикаций по охлаждению оборотной воды в градирнях. Представлен краткий анализ конструкций малогабаритных градирен. Рассмотрены научные исследования в области модернизации контактных устройств и математического моделирования тепломассообмена в градирнях. В результате проведенного анализа конструкций, предназначенных для охлаждения воды, можно выделить следующие 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** представлена математическая модель процесса тепломассообмена в противоточной пленочной градирне с учетом возможных неравномерностей распределения потоков воды и воздуха в насадках.

Применяется модель тепломассообмена с осреднением межфазных потоков по локальному объему, что значительно упрощает решение. Используется понятие объемных межфазных источников, которые связаны с коэффициентами переноса и движущими силами

процессов. Дальнейшее упрощение подхода к моделированию тепломассообмена связано с использованием ячеечной модели гидродинамической структуры потоков. Отмечено, что необходимы экспериментальные исследования градири и определение основных параметров моделей. Таким образом, различные упрощения и допущения компенсируются экспериментальной информацией об объекте моделирования, и обеспечивается удовлетворительная точность расчетов.

Система дифференциальных уравнений тепломассообмена для блоков оросителей записана в цилиндрической системе координат для ядра каждой фазы с членами, учитывающими обмен массой влаги и теплотой, т. е. с локальными объемными источниками межфазного переноса.

В ядре газовой фазы применяется модель однородной изотропной турбулентности, предложенная Д. Тейлором и далее развитая А.Н. Колмогоровым и А.М. Обуховым. Коэффициент турбулентного обмена в газовой фазе принимается постоянным за пределами пограничного слоя.

Уравнение конвективного теплообмена в жидкой фазе:

$$\rho_{\text{ж}} c_{\text{рж}} u_{\text{ж}}(r) \frac{\partial T_{\text{ж}}}{\partial x} = (\lambda_{\text{тж}} + \lambda_{\text{ж}}) \frac{\partial^2 T_{\text{ж}}}{\partial x^2} + \frac{(\lambda_{\text{тж}} + \lambda_{\text{ж}})}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T_{\text{ж}}}{\partial r} \right] + R_{\text{т}}. \quad (1)$$

Уравнение конвективного теплообмена в газовой фазе:

$$\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}(r) \frac{\partial I}{\partial x} = (\lambda_{\text{тг}} + \lambda_{\text{г}}) \frac{\partial^2 T_{\text{г}}}{\partial x^2} + \frac{(\lambda_{\text{тг}} + \lambda_{\text{г}})}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T_{\text{г}}}{\partial r} \right] - R_{\text{т}}. \quad (2)$$

Уравнение конвективного массообмена влаги в газовой фазе:

$$w_{\text{г}}(r) \frac{\partial C_{\text{г}}}{\partial x} = (D_{\text{тг}} + D_{\text{г}}) \frac{\partial^2 C_{\text{г}}}{\partial x^2} + \frac{(D_{\text{тг}} + D_{\text{г}})}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial C_{\text{г}}}{\partial r} \right] - R_{\text{м}}. \quad (3)$$

Граничные условия к уравнениям (1)–(3):

- при  $x = H$  (вход воды и выход воздуха):  $T_{\text{ж}} = T_{\text{жн}}$ ;  $\partial I / \partial x = 0$ ;  $\partial C_{\text{г}} / \partial x = 0$ ;
- при  $x = 0$  (выход воды, вход воздуха):  $\partial T_{\text{ж}} / \partial x = 0$ ;  $I = I_{\text{н}}$ ;  $C_{\text{г}} = C_{\text{гн}}$ ;
- при  $r = R_{\text{ст}}$  (на стенке градири):  $\partial T_{\text{ж}} / \partial r = 0$ ;  $\partial I / \partial r = 0$ ;  $\partial C_{\text{г}} / \partial r = 0$ . Аналогично при решении симметрической задачи при  $r = 0$ .

Индексы: н – начальное значение; к – конечное значение;  $H$  – высота слоя насадки, м.

Учитывая, что основное сопротивление охлаждению воды сосредоточено в газовой (воздушной) фазе, в расчетах градири применяют аналогию Льюиса и плотность потока тепла записывают в известной форме:

$$q = \alpha_{\text{ж}} (T_{\text{ж}\infty} - T_{\text{жгр}}) = \alpha_{\text{г}} (T_{\text{жгр}} - T_{\text{г}}) + I_{\text{п}} \beta_x (C_{\text{г}}^* - C_{\text{г}}). \quad (4)$$

Выражение для межфазного источника теплоты в уравнениях (1), (2):

$$R_{\text{т}} = \frac{qdF}{dV} = \frac{\beta_x (I_{\text{гр}} - I) dF}{dV}. \quad (5)$$

Межфазный источник переноса влаги в воздухе имеет форму

$$R_{\text{м}} = \frac{jdF}{dV} = \frac{\beta_{\text{г}} (C_{\text{г}}^* - C_{\text{г}}) dF}{dV}. \quad (6)$$

В численном решении системы уравнений переноса (1)–(3) с источниками (5), (6) используются известные зависимости, характеризующие свойства влажного воздуха для влагосодержания и энтальпии.

Система уравнений (1)–(3), с учетом выше приведенных источников, является замкнутой и решается численными методами при известных функциях профилей скоростей  $u_{\text{ж}}(r)$  и  $w_{\text{г}}(r)$ , коэффициентов массоотдачи и турбулентного обмена. В первом

приближении при равномерных подачах воды и воздуха в блоки регулярных насадок принимается  $u_{\text{ж}}(r) = u_{\text{ж}}, w_{\text{г}}(r) = w_{\text{г}}$ , т. е. скорости средние по сечению, м/с.

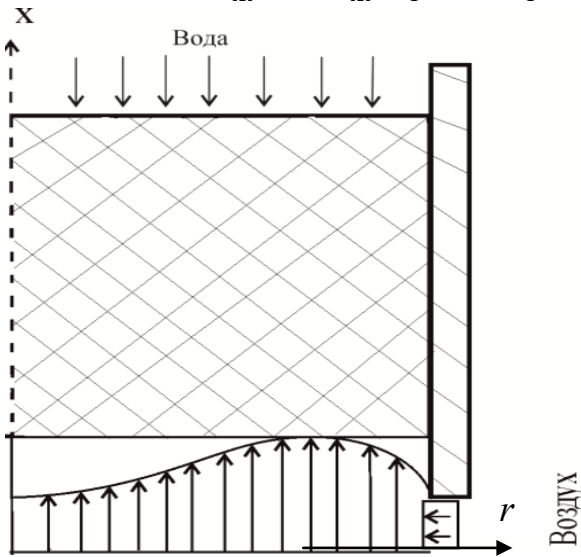


Рис.1 – Примерный профиль скорости воздуха в градирне

Важной и сложной задачей является определение профилей скорости воды и воздуха по поперечному сечению градирни. Современные форсунки обеспечивают довольно равномерное орошение верхнего сечения блоков с насадками. Учитывая, что высота блоков оросителей (насадок) в градирнях находится в пределах 2–2,5 м, можно допустить, что существенного перераспределения воды не происходит, и профиль скорости можно принять как среднерасходный. Профиль скорости воздуха зависит от условий входа в градирню и гидравлического сопротивления блоков насадок по поперечному сечению. При подаче воздуха через боковые окна профиль скорости будет иметь значительную неравномерность, т. е. у стенок больше, а в центре меньше по исследованиям А.С. Пушнова и др. (рис. 1).

На рисунке 2 даны безразмерные профили температуры воды по зонам градирни, полученные из численного решения системы уравнений (1)–(3).

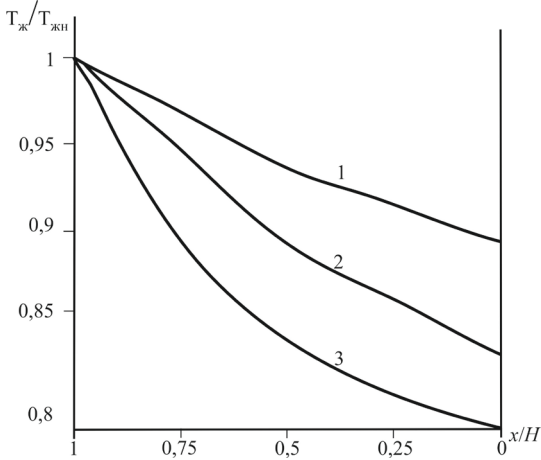


Рис. 2 – Безразмерный профиль температуры воды по высоте регулярной насадки из полимерных труб ( $a_v = 110 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ,  $H = 1,0 \text{ м}$ ) при различных скоростях воздуха в зонах градирни: 1 – скорость в центре градирни  $w_{\text{г}} = 0,8 \text{ м/с}$ ; 2 – средняя скорость  $w_{\text{г}} = 1,5 \text{ м/с}$ ; 3 – скорость в зоне у стенки  $w_{\text{г}} = 2,25 \text{ м/с}$ .  $q_{\text{ж}} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . При  $x/H = 1,0$  вход воды

Также рассмотрена ячеечная модель структуры потоков в контактных устройствах градирен, записанная как при равномерной подаче воды и воздуха, так и при неравномерных профилях скоростей. При записи уравнений ячеечной модели насадка делится на ряд ячеек полного перемешивания по высоте. Число ячеек находится экспериментально и косвенно учитывает обратное перемешивание потоков, которое снижает движущую силу теплопереноса и эффективность процесса охлаждения воды.

Выражение ячеечной модели для теплообмена в жидкой фазе:

$$c_{\text{рж}} L (T_{i-1, \text{ж}} - T_{i, \text{ж}}) = Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Уравнения теплопереноса в газовой фазе и массопереноса испарившейся воды:

$$G (I_{i-1} - I_i) = Q_i, \quad G (C_{i-1} - C_i) = M_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Выражения для потоков:  $Q_i = \beta_x F_i (I_{\text{гр}, i} - I_i)$ ;  $M_i = \rho_{\text{г}} \beta_{\text{г}} F_i (C_i^* - C_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Число ячеек полного перемешивания связано с модифицированным числом Пекле, учитывающим обратное перемешивание потоков. При известном значении  $Pe$  число ячеек можно определить из приближенного соотношения  $Pe = 2(n - 1)$ .

Из решения системы уравнений (1)–(3) или (7), (8) находятся профили температуры воды, энтальпии воздуха и влагосодержание воздуха, что дает возможность вычислить тепловую эффективность охлаждения воды и нагрева воздуха в виде отношений:

$$E_{\text{ж}} = \frac{T_{\text{н,ж}} - T_{\text{к,ж}}}{T_{\text{н,ж}} - T^*}, \quad E_{\text{г}} = \frac{I_{\text{к}} - I_{\text{н}}}{I_{\text{к}}^* - I_{\text{н}}} \quad (9)$$

В результате расчетов установлено, что при равномерном орошении насадки из-за неравномерности подачи воздуха снижение теплового КПД может составлять на 5–25 % относительных;  $I_{\text{к}}^* = f(T_{\text{жн}}, \varphi = 100 \%)$ .

На рисунке 3 представлены результаты расчетов тепловой эффективности  $E_{\text{ж}}$  градирни при неравномерной подаче воды и неравномерного профиля скорости воздуха  $w_m/w_{\text{ср}}$ , где  $w_m$  – скорость воздуха в локальной области;  $w_{\text{ср}}$  – средняя скорость на все сечение градирни.

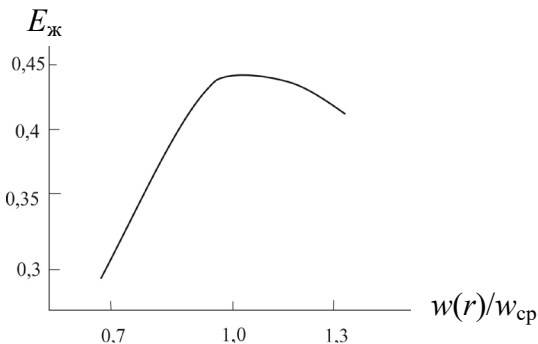


Рис. 3— Зависимость тепловой эффективности от неравномерности распределения скорости воздуха. Расход в центре  $15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , в области у стенки  $q_{\text{ж}} = 5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Насадка  $a_v = 75 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , высота блоков насадки  $H = 1,5 \text{ м}$

В третьей главе дано описание экспериментальной установки и приведены данные исследования тепломассообмена в пленочной градирне с различными насадками.

На рисунке 4 представлена схема экспериментальной установки с колонной для исследования процесса охлаждения воды воздухом. Нагрев воды происходит в емкости Е электронагревателем ЭЛ. На схеме К – колонна макета градирни из оргстекла с внутренним диаметром 190 мм, высота колонны 2,0 м;  $N1, N2$  – насосы; В – вентилятор (газодувка); Е – емкость. Измерение температур воды и воздуха осуществляется термопарами на входе потоков  $T_{\text{жн}}, T_{\text{гн}}$  и на выходе –  $T_{\text{жк}}, T_{\text{гк}}$ ; измеряются также объемные расходы воды  $V_{\text{ж}}$  и воздуха  $V_{\text{г}}$ ; влагосодержание воздуха  $C_{\text{н}}$  и  $C_{\text{к}}$ , кг/кг; перепад давления воздуха в насадке  $\Delta P_{\text{г}} = P_1 - P_2$ , Па.

Для орошения используется распылитель воды с отверстиями диаметром 1 мм; число отверстий 130 шт. Число точек орошения около 1000 на  $\text{м}^2$ . Высота регулярной насадки  $H_1 = 1,0 \text{ м}$ ; нерегулярной –  $H_2 = 0,20 \text{ м}$ . Общая высота комбинированной насадки  $H = 1,2 \text{ м}$ . Удельная поверхность трубчатой регулярной насадки  $a_v = 110 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Высота выступов кольцевой шероховатости – 3,9 мм; ширина – 4,5 мм; расстояние между выступами – 2,5 мм. Допущения: основной тепломассообмен происходит в насадочных слоях; теплопередача через стенки градирни в окружающий воздух незначительная; основное сопротивление тепломассообмену сосредоточено в газовой фазе.

Так как изготовить трубы с дискретной кольцевой регулярной шероховатостью (выступами с наружной стороны и впадинами на внутренней) не представлялось возможным, были использованы полиэтиленовые трубы, которые применяются в промышленности, а также в бытовых условиях. Так как основное сопротивление тепломассообмену при охлаждении воды воздухом сосредоточено в газовой (воздушной) фазе, изучение волнового течения пленки жидкости не выполнялось, а целью являлось измерение тепломассообменных характеристик и гидравлического сопротивления блоков оросителей.

Нерегулярная насадка, засыпанная поверх основного слоя, выполняет несколько функций. Во-первых, более равномерное орошение регулярной насадки за счет перераспре-



деления жидкой фазы хаотичными элементами. Во-вторых, создание дополнительного контакта фаз; в-третьих – уменьшение расстояния от распылителя жидкости до слоя насадки. Известно, что на большом расстоянии происходит значительное дробление струй на капли и мелкие капли при повышении скорости начинают захватываться газовым потоком и уноситься в шлемовую линию аппарата (а в градирне – в атмосферу).

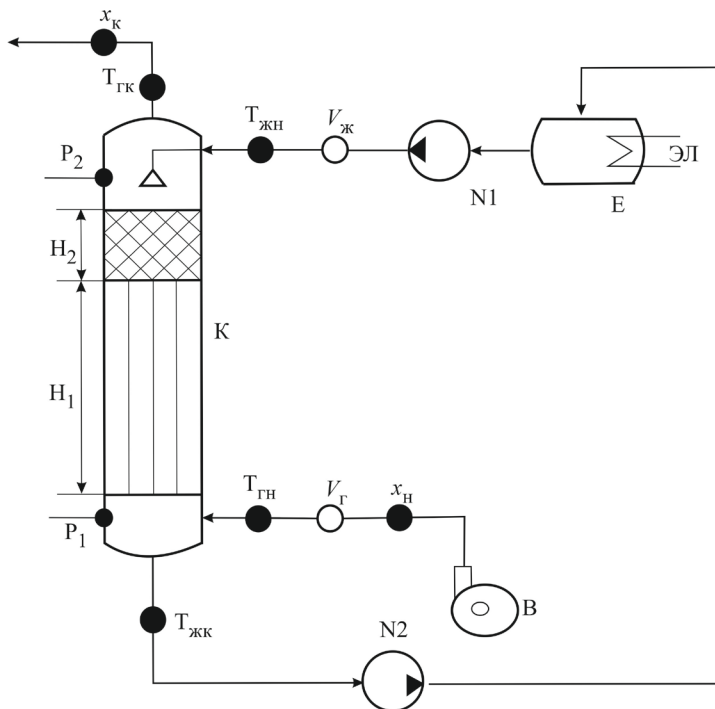


Рис. 4– Принципиальная схема экспериментальной установки:

К – колонна; В – вентилятор (газодувка); N – насосы; Е – емкость; N<sub>1</sub>– высота слоя регулярной насадки из вертикальных труб; H<sub>2</sub> – высота слоя нерегулярной (хаотичной) насадки; ЭЛ – электронагреватель воды. Остальные обозначения в тексте

В качестве регулярной насадки применялись гладкие и с регулярной кольцевой дискретной шероховатостью полиэтиленовые трубки диаметром 50 мм в количестве 10 шт., а нерегулярной (хаотичной) – аналогичные трубки, нарезанные в цилиндры высотой 50 мм, в количестве 35 шт. (т. е. аналог колец Рашига 50×50 мм), а также металлические «Инжехим–2012» размером 16 мм. Удельная поверхность верхнего слоя с кольцами –  $77 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , с «Инжехим–2012» –  $267 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , нижнего слоя с вертикальными трубами –  $110 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Удельный свободный объем всех насадок  $\varepsilon_{\text{св}} = 0,95$ . Температура воздуха в зависимости от температуры окружающей среды от эксперимента к эксперименту находилась в интервале  $T_{\text{гн}} = 25\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$ , а воды –  $T_{\text{жн}} = 35\text{--}38 \text{ }^\circ\text{C}$ . Плотность орошения  $q_{\text{ж}} = 8,8\text{--}19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; скорость воздуха  $w_{\text{г}} = 0,8\text{--}2,6 \text{ м/с}$ . Расходные параметры соответствуют работе промышленных пленочных градирен и мини-градирен, а также ряда других теплообменных аппаратов, например абсорберов и скрубберов-охладителей газов.

Эксперименты выполнялись в три этапа. Первоначально исследовалась насадка только из полиэтиленовых гладких, а затем и шероховатых труб 50 мм ( $H_1 = 1,0 \text{ м}$ ) без верхнего хаотичного слоя, затем с верхним слоем ( $H_2 = 0,2 \text{ м}$ ) из полиэтиленовых колец (50×50 мм) и на третьем этапе с хаотичной металлической насадкой «Инжехим–2012» 16 мм ( $H_2 = 0,2 \text{ м}$ ).

При экспериментальных исследованиях процесса на макете насадочной градирни измерялись: объемные расходы воды  $V_{\text{ж}}$  и воздуха  $V_{\text{г}}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ; температуры воды на входе  $T_{\text{жн}}$ , выходе  $T_{\text{жк}}$ ,  $^\circ\text{C}$ ; температуры воздуха на входе  $T_{\text{гн}}$ , выходе  $T_{\text{гк}}$ ,  $^\circ\text{C}$ ; влагосодержание на входе  $C_{\text{н}}$  и выходе  $C_{\text{к}}$ ,  $\text{кг/кг}$ ; перепад давления воздуха насадочного слоя  $\Delta P_{\text{г}} = P_1 - P_2$ , Па. Погрешность экспериментальных исследований не более  $\pm 7\text{--}8 \%$ .

Вычислялась удельная энтальпия воздуха на входе, значения удельных энтальпий на линии насыщения, количество испарившейся жидкости.

На рисунке 5 приведены экспериментальные данные по перепаду давления воздуха. Очевидно, что перепад давления комбинированного слоя с насадкой «Инжехим–2012» больше, чем из колец, из-за более высокой удельной поверхности.

Экспериментальные исследования регулярной насадки из труб с дискретно-регулярной шероховатостью без орошения и без верхнего хаотичного слоя дают зависимость коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi_{1\text{сух}} \approx 2,2/Re_3^{0,3}$  при  $1500 < Re_3 < 5500$ , верхнего хаотичного слоя из колец  $50 \times 50$  мм с шероховатостью –  $\xi_{2\text{сух}} \approx 2,2$ , который слабо зависит от числа Рейнольдса. Коэффициент сопротивления верхнего слоя из хаотичной насадки «Инжехим–2012» также слабо зависит от числа Рейнольдса. Получено выражение  $\xi_{\text{сух}} \approx 6,5/Re_3^{0,135}$ ;  $Re_3 = w_{\Gamma} d_3 / \nu_{\Gamma}$ .

Полный перепад давления воздуха сухого комбинированного насадочного слоя  $\Delta P_{\text{сух}} = \Delta P_1 + \Delta P_2$ .

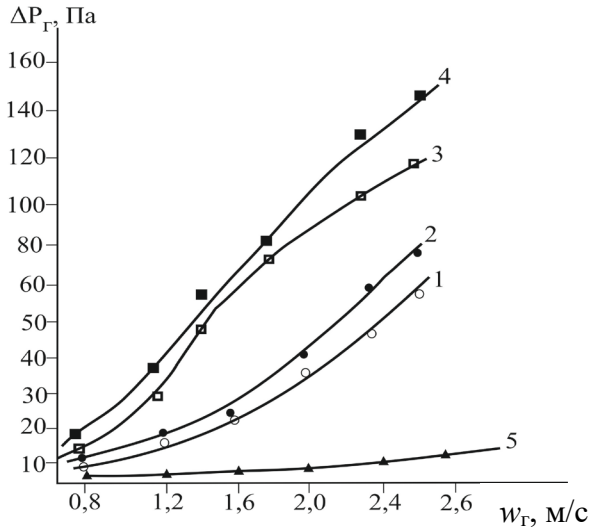


Рис. 5 – Зависимость перепада давления комбинированных насадочных слоев от скорости воздуха: 1, 2 – комбинация с кольцами; 3, 4 – комбинация с «Инжехим–2012». 1, 3 – плотность орошения  $q_{\text{ж}}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; 2, 4 –  $q_{\text{ж}}=19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; 5 – трубы без верхнего слоя при  $q_{\text{ж}}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Для орошаемой насадки из гладких труб получена эмпирическая зависимость, которая обобщает экспериментальные данные ( $\pm 15\%$ ):

$$\xi_{\text{ор}} = \xi_{\text{сух}} + 4,0 \cdot 10^{-3} \frac{q_{\text{ж}}}{w_{\Gamma}}, \quad (10)$$

где  $\xi_{\text{сух}} \approx 0,316/Re_3^{0,25}$  – коэффициент сопротивления труб без орошения;  $8,8 \leq q_{\text{ж}} \leq 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;  $1,2 \leq w_{\Gamma} \leq 2,6$ ;  $d_3 = 0,033 \text{ м}$ ; система «воздух – вода» при средней температуре  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для орошаемой насадки с шероховатой поверхностью

$$\xi_{\text{ор}} = \xi_{\text{сух}} + 0,23 Re_{\text{ж}}^{0,5} / Re_3^{0,45}, \quad (11)$$

где  $\xi_{\text{сух}} \approx 2,2/Re_3^{0,38}$  – коэффициент сопротивления сухой шероховатой насадки;  $Re_{\text{ж}} = 4q_{\text{ж}}/(a_{\text{в}} \nu_{\text{ж}})$  – число Рейнольдса для жидкой фазы;  $q_{\text{ж}}$  – плотность орошения,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;  $Re_3 = w_{\Gamma} d_3 / \nu_{\Gamma}$  – число Рейнольдса для воздуха. Интервал применения формулы (11)  $2500 \leq Re_3 \leq 5600$ ;  $8,8 \leq q_{\text{ж}} \leq 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;  $80 \leq Re_{\text{ж}} \leq 250$ ;  $d_3 = 0,033 \text{ м}$ ; система «воздух – вода» при средней температуре  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Перепад давления комбинированной насадки из шероховатых труб и «Инжехим–2012» будет суммой:

$$\Delta P_{\text{ор}} = \left( \frac{2,2}{Re_{31}^{0,38}} + 0,23 Re_{\text{ж}}^{0,5} / Re_3^{0,45} \right) \frac{H_1 \rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}{2d_{31}} + \left( \frac{6,5}{Re_{32}^{0,135}} \cdot 10^{0,002 q_{\text{ж}}} \right) \frac{H_2 \rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}{2d_{32}}, \quad (12)$$

где  $d_{31} = 0,033 \text{ м}$  – эквивалентный диаметр насадки из шероховатых труб;  $d_{32} = 0,0142 \text{ м}$  – для насадки «Инжехим–2012». Соответственно,  $Re_{31} = w_{\Gamma} d_{31} / \nu_{\Gamma}$ ;  $Re_{32} = w_{\Gamma} d_{32} / \nu_{\Gamma}$ . Высота слоев :  $H_1 = 1,0 \text{ м}$ ,  $H_2 = 0,2 \text{ м}$ .

Поток теплоты в градирне в известной форме:

$$Q = G(I_{\text{к}} - I_{\text{н}}) = \beta_{\text{х}} F \Delta t_{\text{ср}}. \quad (13)$$

Объемный коэффициент массоотдачи

$$\beta_{xv} = \frac{\beta_x F}{S H} = \frac{G(I_K - I_H)}{S H \Delta t_{cp}}. \quad (14)$$

На рисунке 6 даны экспериментальные зависимости объемных коэффициентов массоотдачи от скорости воздуха для комбинированных насадок. При повышении скорости воздуха и плотности орошения объемные коэффициенты увеличиваются. Объемные коэффициенты массоотдачи комбинированных насадок больше на 20–35 %, чем у шероховатой насадки без верхнего слоя. У насадки из гладких труб без верхнего хаотичного слоя коэффициент массоотдачи меньше на 8–12 %, а у цилиндрической сетчатой насадки, исследованной Лаптевым А.Г., Ведьгаевой И.А., меньше в 1,5–3 раза (кривая 6).

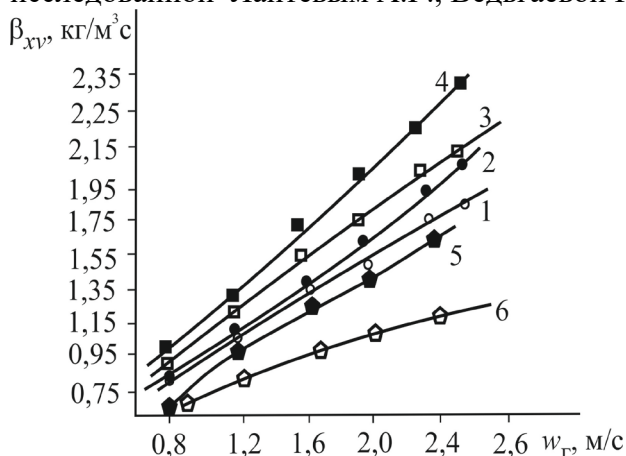


Рис. 6— Зависимость объемных коэффициентов массоотдачи различных насадок от скорости воздуха. Комбинированная насадка с кольцами (кривые 1, 2) и «Инжехим–2012» (кривые 3, 4). 1, 3 —  $q_{ж}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; 2, 4 —  $q_{ж}=19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; 5 — гладкие трубы; 6 — сетчатая насадка при  $q_{ж}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Для комбинированной шероховатой насадки с хаотичной «Инжехим–2012» (16 мм) зависимость объемного коэффициента массоотдачи получена в виде

$$\beta_{xv} = 0,198 q_{ж}^{1,02} (G/L)^{0,75}. \quad (15)$$

Выражение (14) обеспечивает согласование с осредненными экспериментальными данными в пределах  $\pm 12 \%$ .

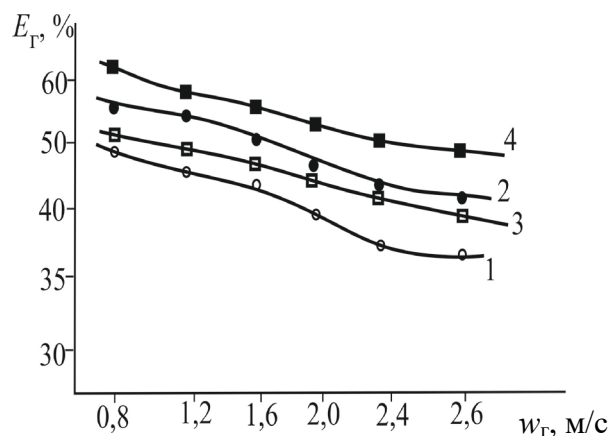
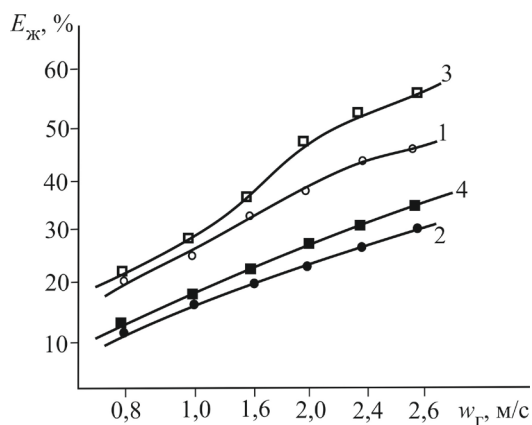


Рис. 7— Зависимость тепловой эффективности охлаждения воды от скорости воздуха:

1,2 — комбинация с кольцами; 3,4 — комбинация с «Инжехим–2012».

1,3 — плотность орошения  $q_{ж}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ; 2,4 —  $q_{ж}=19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

На рисунке 7 представлены экспериментальные зависимости тепловой эффективности от скорости воздуха при различной плотности орошения. С комбинированной насадкой «Инжехим–2012» эффективность охлаждения воды выше на 15–30 %, чем в комбинации с кольцами. Эффективность в жидкой фазе  $E_{ж}$  при увеличении скорости воздуха повышается, а в газовой фазе  $E_r$  — понижается. Повышение  $E_{ж}$  объясняется большим расходом охлаждающего воздуха и его турбулизацией. Снижение  $E_r$  при увеличении скорости  $w_r$  происходит из-за зависимости теплового числа единиц переноса

$N_r = \beta_{xv}SH/(\rho_r V_r)$ , где числитель повышается при увеличении  $w_r$  примерно в степени 0,7–0,8 (коэффициент массоотдачи), а знаменатель – в первой степени (расход воздуха). Это в итоге дает понижение  $N_r \sim w_r^{-(0,2-0,3)}$ , что и вызывает уменьшение тепловой эффективности  $E_r$  в газовой фазе, исходя из законов теплопередачи.

В четвертой главе представлена разработанная конструкция мини-градирни с комбинированными насадками. Рассмотрено применение мини-градирни с рулонной гофрированной насадкой в качестве замены крупномасштабных промышленных градирен. Показано, что мини-градирни обеспечивают повышение гидравлической нагрузки и эффективности охлаждения оборотной воды.

Запатентована конструкция мини-градирни с комбинированным расположением насадок (рис. 8).

Сверху колонны поступает вода, которую необходимо охладить. Вода самотеком проходит последовательно через слой хаотичной 1 и регулярной 2 насадки, таким образом увеличивается поверхность контакта фаз «жидкость–газ». Вентилятор 3 создает восходящий поток воздуха, поступающего в аппарат через воздухоподводящие окна 10, при взаимодействии которого с водой в противотоке происходит процесс теплообмена и охлаждения воды. Режим течения пленки жидкости волновой, а воздуха – турбулентный.

Плотность орошения в такой мини-градирне достигает  $40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , что в 2–3 раза выше, чем у крупногабаритных градирен. Следовательно, и габариты градирни будут в 2–3 раза меньше. В результате математического моделирования установлено, что тепловая эффективность предлагаемой мини-градирни может достигать 96%.

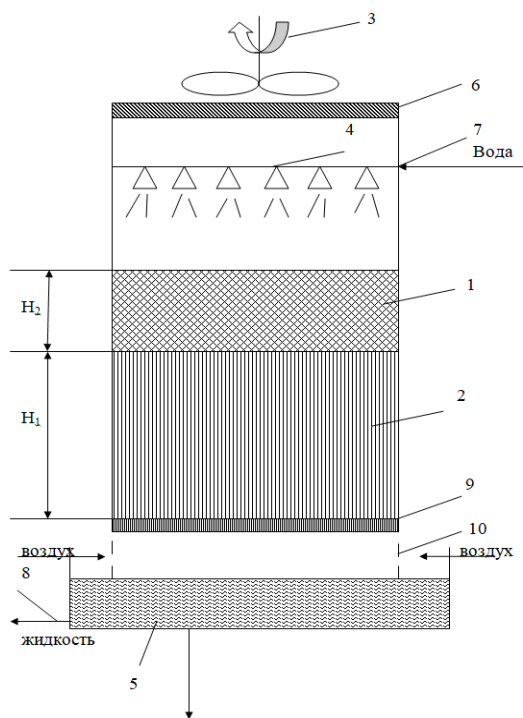


Рис. 8– Мини-градирня с насадками:  
1 –хаотичная насадка с высотой слоя  $H_2 = 0,25 H_1$ ;  
2 – регулярная насадка; 3 – вентилятор; 4 – сопла для подачи воды; 5 – бассейн для сбора воды;  
6 – сетчатый каплеуловитель; 7 –коллектор для подачи воды; 8 – коллектор для выхода охлажденной воды; 9 – опорная решетка для насадки; 10 –окна подачи воздуха

Для расчета тепловых характеристик мини-градирни применялась разработанная математическая модель, представленная во второй главе, а также модифицированный метод единиц переноса с учетом обратного перемешивания потоков.

Получено выражение для определения высоты блоков оросителей при заданном режиме охлаждения воды:

$$H = \left[ \frac{G}{\beta_x a_v S \psi_w} + d_3 \left( 1,4 Pe_{\text{эГ}}^{-1} + 1,4 Pe_{\text{эЖ}}^{-1} \right) \right] \frac{I_{\text{ГН}} - I_{\text{КН}}}{\Delta I_{\text{ср}}} \quad (16)$$

Числа Пекле ( $Pe_{\text{эГ}} = w_r d_3 / D_{\text{пг}}$ ,  $Pe_{\text{эЖ}} = u_{\text{ж}} d_3 / D_{\text{пж}}$ ) для стекающей по регулярной насадке пленки воды и воздушного потока вычисляются по известным эмпирическим выражениям.

Рассмотрена замена крупномасштабной градирни диаметром 20 м (СК-400) на несколько мини-градирен с высокими удельными нагрузками. Требуемая тепловая эффективность по жидкой фазе задана  $E_{ж}=0,43$ , исходя из эксплуатации промышленной градирни СК-400. Расход воды  $V_{ж}=2500 \text{ м}^3/\text{ч}$ , скорость воздуха  $w_{г}=1,5 \text{ м/с}$ , начальная температура воды  $T_{жн}=38,4^\circ\text{C}$ , требуемая конечная  $T_{жк}=22,3^\circ\text{C}$ , температура воздуха  $T_{гн}=25,8^\circ\text{C}$ , энтальпия воздуха  $I_{гн}=47,2 \text{ кДж/кг}$ , температура мокрого термометра  $T_{мг}=16,8^\circ\text{C}$ , влагосодержание воздуха на входе  $\varphi=36\%$ .

Данные взяты по результатам эксплуатации градирни СК-400 в летний период на АО «Казаньоргсинтез».

Расчет мини-градирни выполнен с сегментной регулярной насадкой «Инжехим»  $a_v=180 \text{ м}^2/\text{м}^3$  и регулярной рулонной насадкой с шероховатой поверхностью «Инжехим»  $a_v=180 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Принята скорость воздуха  $w_{г}=2,6 \text{ м/с}$  и плотность орошения  $q_{ж}=22 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ .

Установлено, что применение мини-градирен позволяет снизить мощность на подачу воды и воздуха в 1,7 раза или 40 кВт. На охлаждение одной тонны воды это составит 16 Вт или 16 кВт на тысячу тонн воды. В год 128800 кВт. Для крупномасштабных промышленных производств, где в водооборотных циклах расходы воды составляют десятки тысяч  $\text{м}^3/\text{ч}$ , экономический эффект весьма существенный.

В таблице 1 даны сводные гидравлические и тепловые характеристики охлаждения воды в мини-градирне с регулярной рулонной насадкой с шероховатой поверхностью «Инжехим».

Таблица 1– Сравнительные характеристики крупномасштабной градирни СК-400 и мини-градирен при охлаждении  $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$  воды с  $33^\circ\text{C}$  до  $25^\circ\text{C}$

Параметры	СК-400	Мини-градирня
Число градирен	1	3
Плотность орошения $q, \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$	7,96	22,0
Скорость воздуха $w_{г}, \text{ м/с}$	1,5	2,6
Расход воздуха $V_{г}, \text{ кг/с}$	555,8	348,5
Тепловая эффективность $E_{ж}, \%$	43	43
Площадь поперечного сечения $S, \text{ м}^2$	314	113,6
Удельная поверхность насадки $a_v, \text{ м}^2/\text{м}^3$	140	180
Высота насадки $H, \text{ м}$	1,5	1,0
Объем насадки $V, \text{ м}^3$	471	113,6
Перепад давления воздуха $\Delta P, \text{ Па}$	88	100
Мощность на подачу воздуха $N, \text{ кВт}$	41,5	29,6
Суммарная мощность на охлаждение воды $N, \text{ кВт}$	95,7	56,6

Таким образом, из данных промышленной эксплуатации и сделанных расчетов следует, что крупногабаритная градирня СК-400 малоэффективна по сравнению с мини-градирней. С применением мини-градирен происходит снижение энергозатрат на подачу воздуха на 40 %. Показаны преимущества применения мини-градирен с современными регулярными насадками в комбинации с хаотичными.

### Заключение

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

теплообмена в блоке оросителей с учетом неоднородности распределения фаз и разработана конструкция мини-градирни с комбинированными насадками, характеризующаяся повышенной тепловой эффективностью охлаждения воды.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. При участии автора создана экспериментальная установка с насадочной градирней (колонной) и выполнена разработка методики эксперимента. Выбраны конструкции насадочных контактных устройств с поверхностными интенсификаторами и комбинированным расположением регулярных и хаотичных элементов (в нижней части – регулярная, в верхней части колонны – хаотичная).

2. В широком изменении режимных параметров (скорость воздуха в градирне от 0,8 до 2,6 м/с и плотность орошения от 8,8 до 19,4 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч)) проведены экспериментальные исследования охлаждения воды с начальной температурой 35–38°С и температурой воздуха на входе 25–30 °С с различной влажностью. Исследованы регулярная трубчатая насадка из гладких полиэтиленовых труб (10 труб), установленных вертикально с высотой 1,0 м в колонне диаметром 190 мм. Диаметр труб 50 мм, удельная поверхность 110 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Также исследована аналогичная насадка с трубами, которые имеют кольцевую дискретно-регулярную шероховатость поверхности. Выполнено комбинирование данной насадки в двух вариантах с расположением в верхней части хаотичного слоя высотой 0,2 м из колец 50×50 мм с аналогичной шероховатостью ( $a_v = 77 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ) и металлической насадкой «Инжехим–2012» 16 мм ( $a_v = 267 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ).

3. В результате экспериментов получены данные по гидравлическому сопротивлению сухих и орошаемых насадок, объемному коэффициенту массоотдачи, тепловой эффективности по газовой и жидкой фазам. Выполнено обобщение полученных данных в виде эмпирических выражений для коэффициентов гидравлического сопротивления и объемного коэффициента массоотдачи. Дано сравнение с экспериментальными данными различных авторов для регулярных насадок.

4. 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). Записана система дифференциальных уравнений теплообмена с частными производными и межфазными источниками теплоты и массы влаги. В результате численного решения установлено влияние неравномерности профиля воздуха (у стенки градирни выше, чем в центре) на тепловую эффективность охлаждения воды, снижение которой может составлять на 30 %. Предложены научно-технические решения по снижению неравномерностей и повышению тепловой эффективности.

5. Применен модифицированный метод единиц переноса для пленочной градирни с учетом обратного перемешивания воды и воздуха в пленочной градирне с интенсификаторами. Получено выражение для расчета тепловой эффективности охлаждения воды с учетом гидродинамической структуры потоков. В результате повышается точность расчетов градирни.

6. Разработана и запатентована конструкция мини-градирни с комбинированной насадкой. В нижней части металлическая рулонная насадка с шероховатой и гофрированной поверхностью, в верхней части – хаотичная насадка «Инжехим». Выполнены расчеты комбинированной насадки по разработанной математической модели. Установлено, что замена промышленной градирни СК-400 на три мини-градирни позволяет снизить энергозатраты на охлаждение воды на 40 кВт или 128800 кВт в год.

Результаты работы приняты к внедрению на филиале АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1 и ООО инженерно-внедренческий центр «Инжехим».

Полученные в диссертации экспериментальные данные по гидравлическим и теплообменным 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 отраслях промышленности.

### Условные обозначения

$a_v$  – удельная поверхность насадки,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $C$  – влагосодержание,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;  $C_T^*$  – 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 межфазной поверхности пленки,  $\text{м}^2$ ;  $G$  – массовый расход газа,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $H$  – высота слоя насадки,  $\text{м}$ ;  $L$  – массовый расход жидкости,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $l$  – характерный размер,  $\text{м}$ ;  $M$  – поток массы испарившейся влаги,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $N$  – мощность,  $\text{Вт}$ ; число единиц переноса;  $n$  – число ячеек полного перемешивания;  $I$  – энтальпия газа,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $q$  – плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $q_{\text{ж}}$  – плотность орошения,  $\text{м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ ;  $\Delta P$  – перепад давления,  $\text{Па}$ ;  $Q$  – тепловой поток,  $\text{Вт}$ ;  $r$  – радиальная координата,  $\text{м}$ ;  $R_T$  – объемный межфазный источник теплопередачи,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;  $R_M$  – объемный межфазный источник переноса влаги,  $\text{с}^{-1}$ ;  $S$  – площадь поперечного сечения градирни,  $\text{м}^2$ ;  $T$  – температура потока,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T^*$  – температура мокрого термометра,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $u_{\text{ср}}$  – средняя скорость среды,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $V$  – объем,  $\text{м}^3$ ;  $V_T$  – 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  $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ ;  $\beta_{\text{хв}}$  – объемный коэффициент массоотдачи  $\text{кг}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$ ;  $\varepsilon_{\text{св}}$  – удельный свободный объем насадки;  $\lambda$  – удельная теплопроводность,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $\nu$ ,  $\nu_T$  – кинематические коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления насадки;  $\rho$  – плотность фазы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\psi_w$  – коэффициент смачиваемости поверхности;  $\varphi$  – влажность воздуха, среднее объемное газосодержание, %;  $\tau$  – касательное напряжение,  $\text{Па}$ ;  $x$  – вертикальная координата,  $\text{м}$ ;  $Re = u_{\text{ср}}/D_{\text{п}}$  – число Пекле структуры потока (критерий Боденштейна);  $Re = u_{\text{ср}}/\nu$  – число Рейнольдса;  $G$ ,  $g$  – газовая фаза;  $gr$  – значение параметров на границе раздела фаз;  $ж$ ,  $x$  – жидкая фаза;  $к$  – значение параметров на выходе;  $мт$  – мокрый термометр;  $н$  – значение параметров на входе;  $ор$  – орошаемая насадка;  $п$  – пар;  $с$  – сплошная фаза;  $ср$  – среднее значение;  $ст$  – значение параметров на стенке;  $сух$  – сухая насадка;  $т$  – турбулентность;  $\infty$  – значение параметров в ядре потока;  $ш$  – шероховатая поверхность;  $\varepsilon$  – эквивалентный.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

#### *Научные публикации в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий:*

1. Lapteva, E. A. Thermohydraulic of the process of cooling of water in miniature cooling towers with regular packing / E. A. Lapteva, **E. Y. Stolyarova**, A. G. Laptev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – Т. 54. – № 3–4. – С. 161–164.
2. Lapteva, E. A. Numerical estimation of the heat and mass transfer efficiency considering nonuniformity in water and air distribution / E. A. Lapteva, **E. Yu. Stolyarova**, A. G. Laptev // Thermal Engineering. – 2020. – Т. 67. – № 4. – С. 234.
3. Лаптева, Е. А. Снижение энергозатрат на охлаждение воды с применением мини-градирен / Е. А. Лаптева, **Е. Ю. Столярова** // Труды Академэнерго. – 2020. – № 2 (59). – С. 23–30.
4. Лаптева, Е. А. Трение в восходящем газожидкостном потоке в канале с хаотичной насадкой / Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев, **Е. Ю. Столярова** // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2017. – № 1–2. – С. 170–173.
5. Лаптева, Е. А. Модель структуры потока и эффективность пленочной градирни с учетом неравномерности распределения фаз / Е. А. Лаптева, **Е. Ю. Столярова**, А. Г. Лаптев // Фундаментальные исследования. – 2018. – № 11–2. – С. 150–154.

**Патент и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:**

6. Патент № 175714 Российская Федерация, МПК F28C 1/00 (2006.01). Мини градирня с насадками: заявл. 10.04.2017 : опубл. 15.12.2017 / Лаптева Е. А., **Столярова Е. Ю.**, Лаптев А.Г.; заявитель ФГБОУ ВО «КГЭУ». – 5 с. – Текст : непосредственный.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616879 Российская Федерация. Расчет высоты блоков оросителей градирни: заявл. 22.04.2021 : опубл. 28.04.2021/ Лаптев А. Г., Лаптева Е. А., **Столярова Е. Ю.**; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «КГЭУ». – 1 с. – Текст : непосредственный.

**Прочие публикации, входящие в РИНЦ**

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

9. Лаптева, Е. А. Энергетические характеристики пленочных градирен/ Е. А.Лаптева, А. Г. Лаптев, **Е. Ю. Столярова**// Тр. Междунар. науч.-практ. конф.«Результаты современных научных исследований и разработок».– Пенза, 2017. – С. 46–51.

10. Лаптева, Е. А. Исследование процессов тепломассобмена в мини градирне / Е. А.Лаптева, **Е. Ю. Столярова**//Тр. Междунар. молодежной науч. конф. Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация». – Казань, 2021.– С. 240–243.

11. Лаптева, Е. А. Исследование тепловой эффективности охлаждения воды в распыливающем аппарате/ Е. А. Лаптева, **Е. Ю. Столярова**// Тр. VIII Национ. конф. с междунар. участием «Моделирование энергоинформационных процессов».– Воронеж, 2020. – С. 281–283.

12. Лаптева, Е. А.Метод числа единиц переноса расчета охлаждения воды в пленочных контактных устройствах градирни/ Е. А.Лаптева, **Е. Ю. Столярова**// Тр. III Всерос. конф. «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». – Кемерово, 2017.– С. 146.

13. Лаптева, Е. А.Эффективность охлаждения воды в мини-градирне с дискретно-шероховатой регулярной насадкой / Е. А.Лаптева, **Е. Ю. Столярова**// Тр.VI Всерос. конф. «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». – Кемерово, 2021.– С. 124-1–124-5.

14. Лаптева, Е. А. Повышение эффективности охлаждения воды в градирнях с комбинированными блоками оросителей / Е. А. Лаптева, **Е. Ю. Столярова**, А. Г.Лаптев// Тр. Междунар.конф. «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». – Кемерово, 2022.– С. 149-1–149-5.

15. **Столярова, Е. Ю.** Экспериментальное исследование насадок на макете мини-градирни // Тр. XXVI Всерос. асп.-маг. сем.– Казань, 2022.– Т. 2. – С. 149–152.

---

Подписано в печать 01.02.2024. 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

---