

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Лаптева Елена Анатольевна

Казань 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Условные обозначения.....	10
Глава 1. КОНСТРУКЦИИ МИНИ ГРАДИРЕН И МЕТОДЫ	
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК	
ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ.....	
1.1 Анализ конструкций малогабаритных градирен.....	14
1.2 Блоки оросителей градирен.....	27
1.3. Экспериментальные и теоретические исследования процессов теплообмена в градирнях. Основные уравнения для расчета теплообмена в градирнях.....	31
Выводы.....	39
Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОМАССОБМЕН-	
НЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛЕНОЧНОЙ ГРАДИРНЕ С НАСАДКАМИ.....	
2.1 Численное моделирование эффективности теплообмена в пленочной градирне с учетом неоднородности распределения воды и воздуха	42
2.2 Модифицированный метод единиц переноса для насадок градирни	64
2.3 Ячеечная модель гидродинамической структуры потока.....	69
Выводы.....	81
Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И	
ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОЧНОЙ	
ГРАДИРНИ С НАСАДКАМИ.....	
3.1 Схема и описание экспериментальной установки	82
3.2 Экспериментальные данные гидравлических и теплообменных характеристик.....	88
3.3 Обработка результатов экспериментальных исследований.....	93
3.4 Результаты экспериментов колонны с насадкой из гладких труб.....	96
3.5 Обобщение полученных результатов.....	108

3.6 Сравнение коэффициентов массоотдачи, полученных экспериментально, с расчетом по математическим моделям.....	112
Выводы.....	117
Глава 4. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОМАССО- ОБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВОДЫ В ГРАДИРНЯХ С КОМБИНИРОВАННЫМИ БЛОКАМИ ОРОСИТЕЛЕЙ	119
4.1 Теплогидравлическая эффективность охлаждения воды в мини градирне с регулярной насадкой.....	119
4.2 Снижение энергозатрат на охлаждение воды с применением мини градирен.....	123
4.3 Алгоритм расчета мини градирни.....	126
4.4 Результаты расчетов охлаждения воды в мини градирне.....	129
4.5 Энергетические характеристики пленочных градирен.....	133
4.6 Результаты расчетов градирен с различными насадками.....	136
Выводы.....	138
Заключение.....	139
Библиографический список.....	142
Приложений 1 Результаты экспериментальных исследований	160
Приложение 2 Технические характеристики контрольно-измерительных приборов.....	182
Приложение 3 Справки о внедрении результатов	191

ВВЕДЕНИЕ

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» (2018-2023г.г.).

Степень проработанности проблемы. В развитии теории и практики теплообмена в градирнях особый вклад внесли Ф. Меркель, Б.В. Проскуряков, 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 в комбинированных насадках с интенсификаторами.

2. На основе решения составленной системы дифференциальных уравнений тепломассообмена с частными производными численное моделирование тепломассообмена 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 тепломассообмена с частными производными, записанными в цилиндрической системе координат для градирни с регулярной насадкой при противотоке воздуха и пленки воды. Даны выражения для межфазных источниковых 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 $q_{ж} = 8,8-19,4$ м³/(м²час).

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 $40 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$) и скоростью воздуха до $2,8 \text{ м/с}$. 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 тепломассообмена 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 тепломассообмена в пленочных блоках оросителей градирен с учетом неоднородности потоков;
2. Разработанной конструкции мини градирни с насадками;
3. Результатах экспериментальных исследований гидравлических и тепломассообменных 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 страниц машинописного текста, включает 66 рисунков, 20 таблиц. Список литературы из 154 источников.

Условные обозначения

- a – коэффициент теплопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
 a_{τ} – коэффициент турбулентной теплопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
 a_v – удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$;
 C – концентрация влаги, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\text{кг}/\text{кг}$;
 c_p – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;
 D, D_{τ} – коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;
 D_{Π} – коэффициент обратного перемешивания, $\text{м}^2/\text{с}$;
 $D_{\text{к}}$ – диаметр колонны, м ;
 d – диаметр контактного элемента, трубы, м ;
 d_0 – эквивалентный диаметр насадки, канала, м ;
 E – эффективность;
 F – площадь межфазной поверхности пленки, м^2 ;
 G – массовый расход газа, $\text{кг}/\text{с}$;
 H – высота слоя насадки, м ;
 L – массовый расход жидкости, $\text{кг}/\text{с}$;
 l – характерный размер, м ;
 N – мощность, Вт ; число единиц переноса;
 n – число ячеек полного перемешивания;
 I – энтальпия, $\text{Дж}/\text{кг}$;
 I^* – энтальпия равновесная;
 Q – тепловой поток, Вт ;
 q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
 $q_{\text{ж}}$ – плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{час})$;
 ΔP – перепад давления, Па ;
 R – радиус контактного устройства, м ;
 S – площадь поперечного сечения градирни, м^2 ;
 T – температура потока, $^{\circ}\text{C}$;
 u_{∞} – скорость внешнего потока, $\text{м}/\text{с}$;
 u_* – динамическая скорость, $\text{м}/\text{с}$;

u_{cp} - средняя скорость среды, м/с;

V – объем, м³;

w_r – средняя скорость газа в колонне, м/с;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

β - коэффициент массоотдачи, м/с или кг/(м²с);

β_{xv} – объемный коэффициент массоотдачи кг/(м³с);

ΔP – перепад давления, Па;

M_i - поток массы испарившейся влаги;

ε – средняя скорость диссипации энергии, Вт/м³ или м²/с³;

$\varepsilon_{св}$ – удельный свободный объем насадки;

λ – удельная теплопроводность, Вт/(м·К);

μ – динамическая вязкость, Па·с;

ν , ν_T – кинематические коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости, м²/с;

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления насадки;

ρ – плотность фазы, кг/м³;

σ – поверхностное натяжение, Н/м;

τ – касательное напряжение, Па.

ψ_w – коэффициент смачиваемости поверхности;

φ – влажность воздуха, среднее объемное газосодержание;

χ – коэффициент пропорциональности;

Δx – размер ячеек.

Комплексы

$C_f = 2\tau / (\rho u_{cp}^2)$ – коэффициент трения;

$Pe = u_{\infty} l / D_n$ – число Пекле структуры потока (критерий Боденштейна);

$Nu = \alpha l / \lambda$ – число Нуссельта;

$Sh = \beta l / D$ – число Шервуда;

$Re = u_{cp} l / \nu$ – число Рейнольдса;

$Sc = \nu / D$ – число Шмидта;

$Pr = \nu / a$ – число Прандтля.

Нижние индексы

G, г – газовая фаза;

гр – значение параметров на границе раздела фаз;

гл – гладкая поверхность;

ж, х – жидкая фаза;

мт – мокрый термометр;

н, к – значение параметров на входе и на выходе;

ор – орошаемая насадка;

п – пар;

с – сплошная фаза;

ср – среднее значение;

ст – значение параметров на стенке;

сух – сухая насадка;

т – турбулентность;

∞ – значение параметров в ядре потока;

ш – шероховатая поверхность;

э – эквивалентный;

i – номер ячейки.

ГЛАВА 1. КОНСТРУКЦИИ МИНИ ГРАДИРЕН И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ

В данной главе рассмотрены различные конструкции аппаратов для 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.

Введение

В цикле промышленных предприятий применяется различное оборудование (компрессоры, конденсаторы, ректификационные колонны, теплообменники), в котором обязательным условием для обеспечения его работоспособности является охлаждение теплоносителей. Для того, чтобы поддерживать требуемый температурный интервал, требуется отвод образующейся в процессе эксплуатации тепловой энергии от объекта. Наиболее востребованным и оптимальным хладагентом является вода, а в качестве устройства для охлаждения оборотной воды используются градирни [1].

Высокая стоимость систем водоснабжения, повышение требований к качеству снятия низкопотенциального тепла заставляет прибегать к новым способам для обеспечения требуемых показателей при сниженных технико-экономических нагрузках [2].

Конструкции градирен различны, отличаются габаритами, особенностью подачи охлаждаемых и охлаждающих сред, оросительными и насадочными элементами, размерами затрат на эксплуатацию. Однако наибольшее

распространение в промышленности и энергетической области получили вентиляторные пленочные градирни [3].

К одним из рациональных методов повышения эффективности теплообмена в градирне относится внесение изменений в ее конструктивные особенности путем установки или модернизации оросителя [3-7].

Актуальными являются исследования в области разработки новых видов конструкций охлаждающего оборудования, способствующие снижению энергозатрат и габаритов градирен. Локальные системы позволяют сократить расходы на эксплуатацию, повысить эффективность, надежность и негативное воздействие на окружающую среду как теплообменного оборудования, так и предприятия в целом [8-11].

В введении к диссертационной работе (стр. 4) отмечен значительный вклад российских и зарубежных ученых в области экспериментальных исследований, математического моделирования и разработки конструкций градирен. Так как в данной диссертационной работе основное внимание сосредоточено на математическом моделировании и экспериментальных исследованиях теплообмена применительно к мини градирням, в следующем разделе (1.1) дан обзор конструкций мини градирен, в разделе 1.2 – виды блоков оросителей, а в разделе 1.3 – методы математического моделирования и экспериментального исследования процесса охлаждения воды воздухом.

1.1. Анализ конструкций малогабаритных градирен

1.1.1. Градирня «Росинка»

Градирня «Росинка» применяется в закрытых системах охлаждения для поддержания заданной температуры охлаждающей среды. Она находит широкое применение как в химической промышленности, так и в энергетике.

В «Росинке» организовано противоточное движение жидкости (воды) и газа (воздуха). Охлаждение происходит вследствие соприкосновения потоков [12].

Вода, которую необходимо охладить, по напорной трубе 10 подается в водораспределитель 3 и, проходя через водоразбрызгивающие сопла 8, равномерно распределяется. Вентилятор 4 из окружающей среды затягивает воздух в градирню. Нижняя часть оросителя 11 способствует сопротивлению потоку газа, что выравнивает профиль воздуха на входе в аппарат. При давлении воды ≥ 30 кПа вода направляется в верхнюю часть оросителя 12. Достижение уменьшения степени дисперсности жидкой фазы достигается за счет установки призматических решеток 13. Далее вода направляется на нижнюю часть оросителя 1, где также происходит снижение температуры хладагента. Далее вода собирается в водосборном бассейне 2 и через сливной коллектор 5 направляется на нужды предприятия (рис. 1.1).

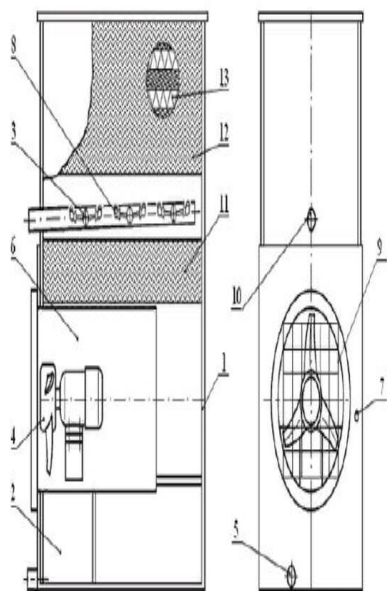


Рисунок 1.1. – Схема конструкции градирни «Росинка»

1 – корпус, 2 – водосборный бассейн, 3 – водораспределитель, 4 – вентилятор, 5 – сливной коллектор, 6 – обечайка вентиляторная, 7 – патрубок ввода электрического кабеля, 8 – сопло водоразбрызгивающее, 9 – защитный кожух вентилятора, 10 – напорная труба, 11 – нижняя часть оросителя, 12 – верхняя часть оросителя, 13 – коническая призма ПР-50.

Основным недостатком данной градирни являются невысокая эффективность вследствие кратковременного взаимодействия жидкости и газа, невозможность равномерного распределения газовой среды, а также повышенные требования к качеству воды системы оборотного охлаждения [13].

В таблице 1.1. приведены основные технические характеристики мини градирни «Росинка».

Таблица 1.1. – Технические характеристики градирни «Росинка»

Основные технические характеристики градирен		Росинка 5	Росинка 10/20	Росинка 30/40	Росинка 50/60	Росинка 80/100
1	2	3	4	5	6	7
Расход воды	м ³ /ч	5	10...20	30...40	50...60	80...100
Перепад температур Δt	°С	6,4	9...6,4	7...6,4	6...5	6,3...5,7
Капельный унос, не более	%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Потери воды на испарение	%	Потери воды на испарение зависят от перепада температур на градирне. Каждые 6,0 °С перепада означают, что потери воды с паром составляют 1% от расхода воды на градирне				
Вентилятор ВО 06-300	исполнение	4	6,3	8	10	12,5
Мощность эл/двигателя	кВт	0,25	1,1	3,0	3,0	4,0

1	2	3	4	5	6	7
Габариты: длина x ширина x высота	м	1,2x0,7x1,7	1,7x1,1x2,0	2,3x1,3x2,3	2,2x1,7x3,5	2,8x2,3x3,9
Габариты для транспортировки:	м	1,2x0,7x1,7	1,7x1,1x2,0	2,3x1,3x2,3	Основание	
					2,2x1,7x2,1	2,8x2,3x2,3
					Корпус верхний	
					2,2x1,7x1,5	2,8x2,3x1,7
Масса при эксплуатации	кг	300±10	700±30	1050±40	2200±50	3600±100
Масса при максимальном наполнении водой, не более	кг	330	880	1440	4140	6530
Расход воды через градирни в зависимости от напора, м ³ /ч						
Напор воды на входе в градирню, кПа (м.вод.ст.)		Росинка 5	Росинка 10/20	Росинка 30/40	Росинка 50/60	Росинка 80/100
20(2)		3	9	18	32	54
1		2	3	4	5	6
30(3)		3,75	11,25	22,5	40	67,5
40(4)		4,2	12,6	25,2	44,8	75,6
50(5)		4,95	14,85	29,7	52,8	89,1
60(6)		5,55	16,65	33,3	59,2	99,9
70(7)		5,85	17,55	35,1	62,4	105,3
80(8)		6,3	18,9	37,8	67,2	113,4
100(10)		7,35	22,05	44,1	78,4	132,3

1.1.2. Градирня ЕВРОМАШ

Градирня ЕВРОМАШ (рис. 1.2) состоит из двух частей: верхней - корпуса 1, в нижней части которого находится ороситель 3, в верхней - каплеотделитель 4, а между ними расположены коллекторы разбрызгивающего устройства с

цельнофакельными форсунками 5; и нижней - бака-водосборника 2 для сбора охлаждаемой воды с установленными на нем вентилятором 6.

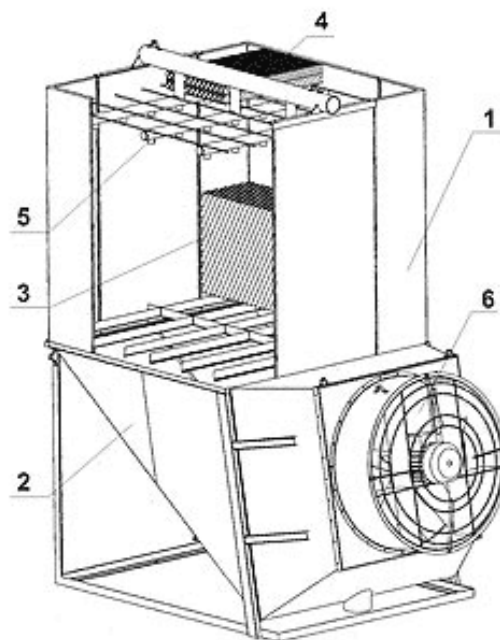


Рисунок 1.2. – Устройство градирни ЕВРОМАШ

1 – корпус, 2 – бак-водосборник, 3 – ороситель, 3 – каплеотделитель, 5 – разбрызгивающее устройство с цельнофакельными форсунками, 6 – вентилятор

Вентиляторные градирни ЕВРОМАШ представляют собой открытый охладитель воды испарительного типа, в котором вода и воздух движутся противотоком, то есть вентилятор нагнетает воздух в градирню навстречу падающей воде. Эти устройства предназначены для установки на открытом воздухе, вне закрытых помещений.

Технические характеристики градирни ЕВРОМАШ приведены в табл. 1.2 [14].

Недостатками данной градирни являются: сложность изготовления, малая эффективность из-за непродолжительного времени контакта воздушного и водного потоков, отсутствие регулировки воздушного потока, подверженность оросителей воздействию низких температур, повышенный каплеунос.

Таблица 1.2. – Основные технические характеристики градирни ЕВРОМАШ

Модификация градирни ЕВРОМАШ-	Тепловой поток*	Номинальный расход охлаждаемой воды**	Габаритные размеры высота × длина × ширина	Диаметр патрубков градирни		Масса сухой градирни ***	Количество форсунок	Осевой вентилятор с рабочим колесом из композитных материалов		
				входной	сливной			Типоразмер	N, кВт	n, мин ⁻¹
			мм	мм	кг					
50	46	8	2000 х 1472 х 724	51	60	125	2	5	0,37	1500
70	70	12	2502 х 1854 х 1010	76	100	231	2	6,3	0,75	1000
100	95	16					3		1,1	1500
120	120	20	3002 х 1854 х 1010				288	4	6,3	0,75
140	140	24				1,1	1500			
160	160	28								
190	190	32	2917 х 3053 х 1030			108	140	435	6	8
300	300	50	3417 х 3053 х 1030	520	10			3,0	1500	
350	350	60	3282 х 3420 х 2010	135	200	844	12	12,5	4,0	750
450	450	75					7,5		1000	
550	550	90					4,0		750	
700	700	120				3782 х 3420 х 2010	990		21	7,5
1000	1000	170	3955 х 4930 х 2135	156	250	1650	35	14	11,0	1000
1650	1650	280	4183 х 6400 х 2135	2х 135	250	2100	48	16	15,0	1000
2400	2325	400	4710 х 7500 х 2350	273	315	3240	72	20	22,0	750

* указаны значения теплового потока, отводимого в окружающую среду при условии прохождения через градирню номинального расхода охлаждаемой воды и обеспечении перепада температур охлаждаемой воды не более 5 °С.

** показан номинальный расход охлаждаемой воды, при котором градирни будут отводить указанное в таблице количество тепла (тепловой поток) в окружающую среду и снижать температуру охлаждаемой воды на 5 °С.

Количество испаряющейся в атмосферу воды составляет 1-2% от величины расхода. Таким же должно быть количество свежей воды, которым будет подпитываться система оборотного цикла водоснабжения, в котором используется градирня.

*** масса сухой градирни. Вес с водой составит +10 % к весу сухой градирни.

1.1.3. Градирня ГРАД

Мини градирня «ГРАД» (рис. 1.3) конструктивно аналогична конструкции градирни ЕВРОМАШ.

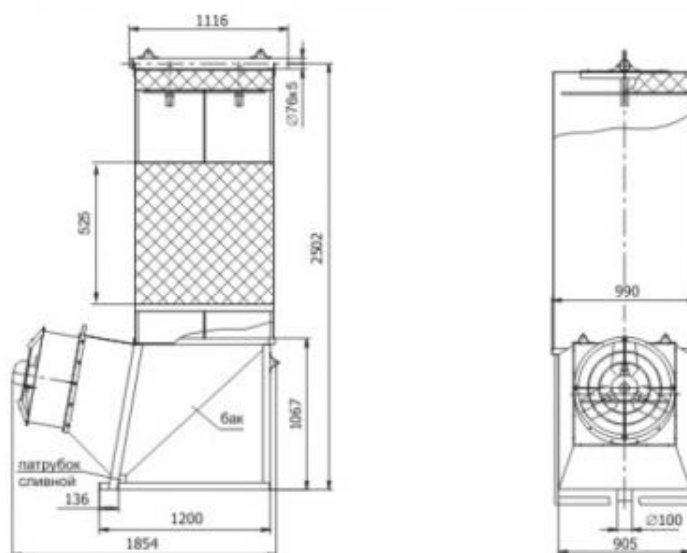


Рисунок 1.3. – Схема градирни ГРАД

Технические характеристики градирен град приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. - Технические характеристики и параметры градирен ГРАД

Модификация градирни ГРАД	ГРА Д-8	ГРАД-12М	ГРАД-16	ГРАД-20М	ГРАД-24	ГРАД-50	ГРАД-75	ГРАД-170	ГРАД-400
Количество охлаждаемой воды, м ³ /час	6	12	6	20	24	50	75	170	400
Площадь поверхности оросителя, м ²	65	88	88	175	130	350	378	985	2670
Расчетный тепловой поток при разности температур по воде $\Delta t=5^{\circ}\text{C}$, кВт	46	70	95	120	140	300	450	1000	2325
Диапазон регулирования производительности, %	40-100	45-100	40-100	45-100	40-100	50-100	40-100	50-100	40-100
Площадь орошения, м ²	0,5	0,95	0,95	0,95	0,95	1,89	3,77	6,5	13
Количество форсунок, шт.	2	2	3	4	4	10	12	35	72
Количество вентиляторов, шт.	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Тип вентилятора	13-284	13-284	13-284	13-284	13-284	13-284	13-284	13-284	13-284
Диаметр рабочего колеса, мм	500	630	630	630	360	800	1250	1400	2000
Частота вращения колеса вентилятора, об/мин	1500	1000	1500	1000	1500	1500	1000	1000	750
Установленная мощность электродвигателя, кВт	0,37	0,75	1,1	0,75	1,1	3,0	7,5	11	22,5

1	2	3	4	5	6	7	8
Тепловая нагрузка G^* , кВт	45÷60	80÷120	140÷230	465÷700	465÷700	465÷700	580÷1165
Капельный вынос, не боле %	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Давление воды на входе в градирню, м.вод.ст.	3÷5	3÷5	3÷5	3÷5	3÷5	3÷5	1÷3
Вид градирни	Поперечноточная нагнетательная			Противоточная нагнетательная			
Габаритные размеры (дл.х шир.х выс.),мм	1950х850х 1725	1950х850х 1725	1960х1230 х2140	2100х2100 х3450	2015х2015 х2960	2800х2115 х2675	2685х2265 х3350
Высота входа воды, мм	1645	1645	2107	2930	2645	2555	3066
Патрубок подачи в оды (Dy 1), мм	50	50	65	160	100	150	150
Сливной патрубок (Dy 2), мм	65	65	100	125	125	200	300
Диаметр вентилятора, мм	630	630	800	2х800	1000	2х630	1000
Параметры электродвигателя, В/Гц/Ф	380/50/3	380/50/3	380/50/3	380/50/3	380/50/3	380/50/3	380/50/3
Мощность электродвигателя, кВт	0,75	1,1	0,75	2х4,0	3,0	2х1,5	7,5
Защита электродвигателя	IP54	IP54	IP54	IP54	IP54	IP54	IP54
Уровень шума (10 метров от градирни), дБ	не более 65	не более 65	не более 65	не более 65	не более 65	не более 65	не более 65
Емкость приемного бака, м ³	0,35	0,35	0,45	1,5	1,2	1,2	2,2
* - расчетная величина, зависящая от расхода оборотной воды Q (м ³ /час), температурного перепада Δt (°C), температуры воздуха по «влажному» термометру τ (°C). Указано при $\Delta t = 10^\circ\text{C}$.							

Недостатками данной градирни являются: малая эффективность из-за непродолжительного времени контакта воздушного и водного потоков, отсутствие регулировки воздушного потока, подверженность оросителей воздействию низких температур, высокий коэффициент аэродинамического сопротивления оросителя.

1.1.5. Градирня ГРД

Градирня ГРД (рис. 1.5) имеют прямоугольную форму с нижним боковым расположением вентиляторов. Градирни состоят из неразъёмного корпуса 1, осевого вентилятора с электроприводом 2, бака для слива охлажденной воды 3, расположенного в нижней части корпуса 1, оросителя 4, каплеуловителя 5, водораспределительного коллектора с форсунками 6, входного 7 и выходного сливного 8 водяных патрубков [16].

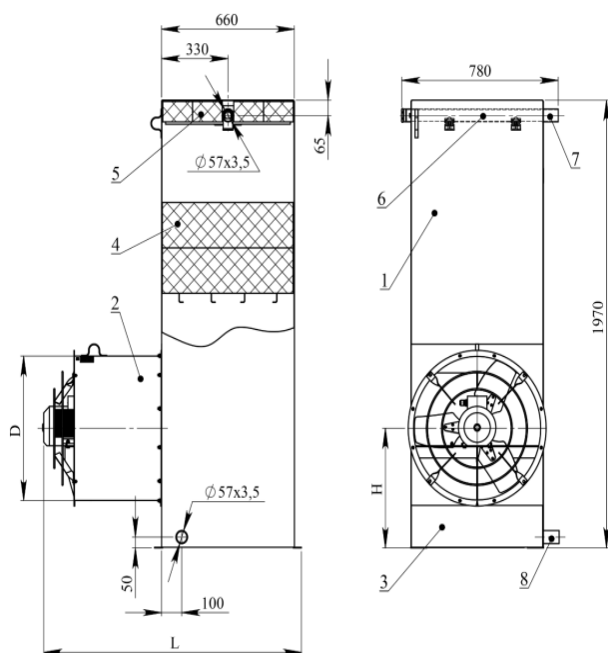


Рисунок 1.5. – Схема градирен ГРД-4, ГРД-8

1 – корпус, 2 – осевой вентилятор, 3 – бак для слива охлажденной воды, 4 – ороситель, 5 – каплеуловитель, 6 – водораспределительный коллектор с форсунками, 7 – входной сливной водяной патрубок, 8 – выходной сливной водяной патрубок.

Габаритные и технические характеристики градирен ГРД приведены в табл.

1.5 и 1.6

Таблица 1.5. – Габаритные характеристики градирен ГРД

Название модели*	Теплов. поток, ** кВт	Размеры, мм			Масса, кг		Кол. э/д, шт.	Мощн. эл/дв, кВт
		шир.	глуб.	выс.	сух.	мокр.		
ГРД - 4Н	23,4	660	660	1970	130	136	1	0,25
ГРД - 4У	23,4	660	660	1970	130	136	1	0,25
ГРД - 8Н	46,4	660	660	1970	150	158	1	1,1
ГРД - 8У	46,4	660	660	1970	150	158	1	1,1
ГРД - 12Н	69,7	800	968	2070	195	209	1	1,5
ГРД - 12У	69,7	800	968	2070	195	209	1	1,5
ГРД - 16Н	92,9	800	968	2070	195	211	1	1,5
ГРД - 16У	92,9	800	968	2070	195	211	1	1,5
ГРД - 24Н	139	920	2040	2415	385	414	1	2,2
ГРД - 24У	139	920	2040	2415	385	414	1	2,2
ГРД - 32Н	186	920	2040	2415	385	420	1	3
ГРД - 32У	186	920	2040	2415	385	420	1	3
ГРД - 50Н	290	920	2090	3350	505	589	1	3
ГРД - 50У	290	920	2090	3350	505	589	1	3
ГРД - 100Н	580	2010	2130	3370	900	1048	2	3
ГРД - 100У	580	2010	2130	3370	900	1048	2	3
ГРД - 150Н	871	2940	2230	3370	1285	1500	3	3
ГРД - 150У	871	2940	2230	3370	1285	1500	3	3
ГРД - 350Н	2031	5970	2220	4060	3210	3806	3	7,5
ГРД - 350У	2031	5970	2220	4060	3210	3806	3	7,5

Таблица 1.6. - Технические характеристики градирен ГРД

Номер модели	Расход охлаждаемой воды, м ³ /час	Тепловой поток,* кВт	Размеры, мм		Вес, кг	
			высота	диаметр	сухая	мокрая
ГРД - 2М	2,3	14	1318	750	30	75
ГРД - 4М	3,9	23	1318	750	35	85
ГРД - 6М	6,2	36	1563	860	41	120
ГРД - 8М	7,8	45	1563	860	45	130
ГРД - 12М	11,7	68	1773	1165	66	210
ГРД - 16М	15,6	90	1773	1165	90	260
ГРД - 20М	19,5	113	1795	1440	137	505
ГРД - 24М	23,4	136	1795	1440	144	522
ГРД - 32М	31,2	181	1775	1560	185	577
ГРД - 40М	39	226	1845	1800	228	650
ГРД - 45М	46,8	271	1845	1800	277	719
ГРД - 50М	54,6	317	2140	1900	337	798
ГРД - 65М	62,4	362	1980	2140	352	982
ГРД - 78М	78	452	2365	2410	474	1205
ГРД - 100М	97,5	565	2330	2730	524	1336
ГРД - 115М	117	679	2465	3050	702	3212
ГРД - 135М	136,5	792	2465	3050	855	3415
ГРД - 150М	156	905	2450	3280	937	3570
ГРД - 175М	175,5	1018	2405			

* - цифра в названии указывает номинальный расход охлаждаемой воды (м³/ч);

- буквы Н и У указывают на материал корпуса градирни:

Н - нержавеющая сталь, У - углеродистая сталь.

** - при номинальном расходе охлаждаемой воды и $\Delta t=5^{\circ}\text{C}$;

- при 50% номинальном расходе охлаждаемой воды и $\Delta t=8-10^{\circ}\text{C}$

ГРД-М - (*при температуре смоченного термометра 27°C и охлаждении воды на 5°C : с 37°C до 32°C .)

Недостатками данной градирни являются: отсутствие регулировки воздушного потока, подверженность оросителей воздействию низких температур, высокий коэффициент аэродинамического сопротивления оросителя.

1.2. Блоки оросителей градирен

Ороситель градирни (блоки насадок) - самый важный технологический элемент градирни. Существует 3 типа оросителей:

- пленочный ороситель (трубчатый или листовой);
- капельный ороситель;
- капельно-пленочный ороситель.

Одним из наиболее востребованных типов оросителей, применяемых в градирнях, является капельно-пленочный ороситель [17-21].

Капельно-пленочный ороситель сочетает в себе низкий коэффициент аэродинамического сопротивления и высокую охлаждающую способность. Благодаря сочетанию этих двух самых важных для оросителя градирни характеристик, данный тип получил большое распространение.

Охлаждение в пленочном оросителе происходит за счет образования пленки на внутренней поверхности блока оросителя. Для качественного охлаждения и для перемешивания воды внутри блока каждый слой блоков требуется разделять специальными вставками. В данном случае это недостаток, так как при неправильном монтаже оросителя уменьшится эффективность охлаждения.

За последние годы значительно увеличилось применение оросителей из полимерных материалов. Имеется много конструкций оросителей, имеющих сетчатую конструкцию [22-40], конструкцию в виде труб из полимерных материалов [41-52]. По многим эксплуатационным свойствам они превосходят оросители, состоящие из металла, дерева, асбеста, цемента и керамики.

1.2.1. Ороситель градирни из слоев полимерных ячеистых труб

Ороситель градирни представляет собой модуль из слоев полимерных труб с ячейками в виде цилиндров. Трубы уложены параллельно и сварены между собой. Пространство между трубами заполнено насадочными элементами (рис. 1.6) [46].

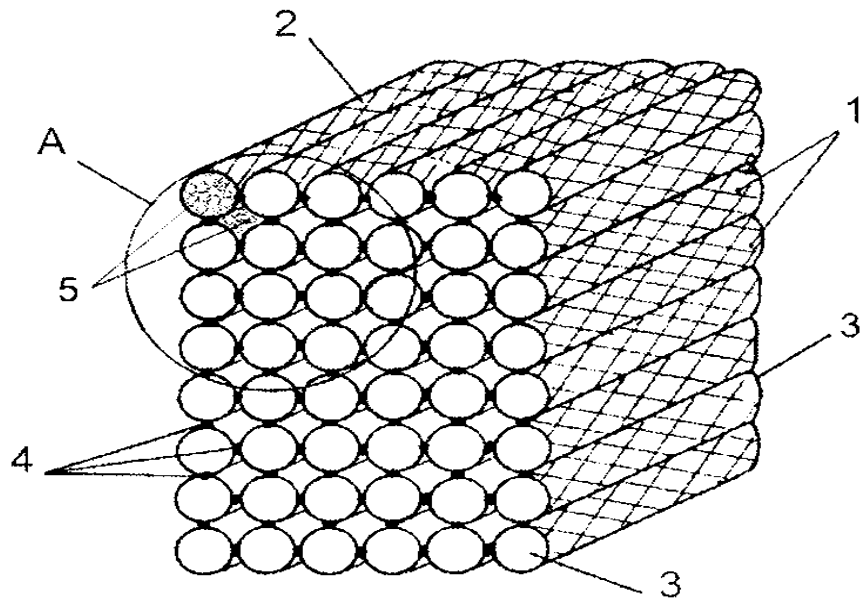


Рисунок 1.6. – Ороситель градири из слоев полимерных ячеистых труб
 1 – модуль оросителя, 2 – полимерная ячеистая труба, 3 – торцы оросителя; 4 – места соединения, 5 – пространство между труб, заполненное полыми полимерными шарами.

1.2.2. Конструкция оросителя градири из полимерных материалов

Ороситель градири представляет собой регулярную насадку из слоев полимерных труб с ячейками, которые согнуты в виде дуги (рис. 1.7) [48].

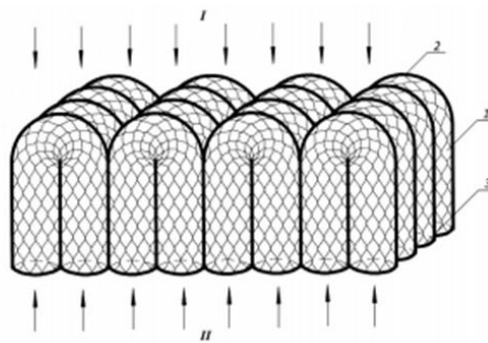


Рисунок 1.7. - Конструкция оросителя градири из полимерных материалов
 1 – трубы полимерные; 2 – гиб; 3 – ребро жесткости.

1.2.3. Ороситель градирен из полимерных перфорированных элементов

Блок оросителя градири (рис. 1.8) содержит расположенные параллельно друг другу и скрепленные между собой вертикальные цилиндрические полимерные элементы [49].

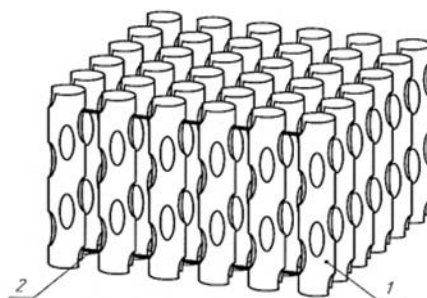


Рисунок 1.8. – Вид оросителя из полимерных перфорированных элементов
1 – цилиндрические элементы; 2 – элементы крепления.

1.2.4. Полимерный капельно-пленочный ороситель градирен

Полимерный капельно-пленочный ороситель градирен модульный из полимерных цилиндрических параллельных оболочек, расположенных в виде сетки (рис. 1.9 а,б) [50].

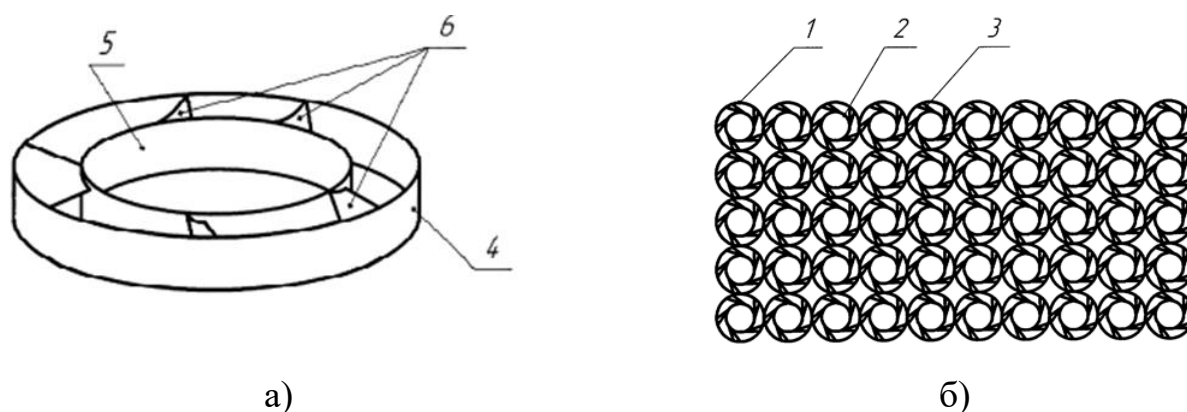


Рисунок 1.9. – Полимерный капельно-пленочный ороситель градирен
1 – полимерные оболочки в виде цилиндров; 2 – оболочка меньшего диаметра; 3 – лопастной завихритель, 4, 5 – полимерные полые цилиндры, 6 – лопатки.

1.2.5. Полимерная труба оросителя градирни

Полимерная труба оросителя градирни (рис 1.10) состоит из плоских стенок и изготовлена в поперечном сечении в виде прямоугольника или квадрата, имеются выступы или впадины, расположенных под углом к сечению трубы, разделенной узкими и широкими гофрами [51].

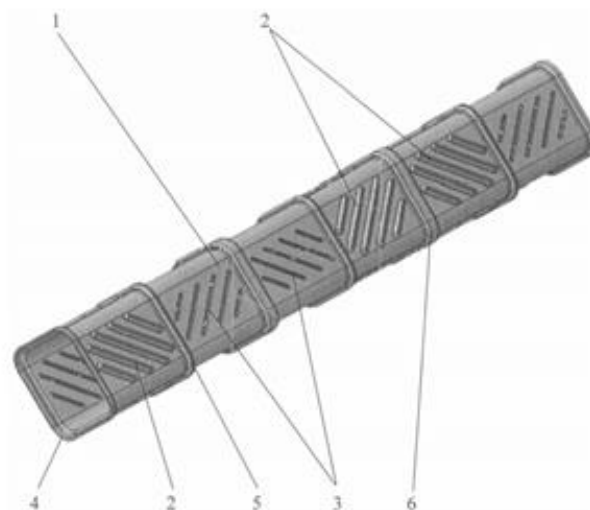


Рисунок 1.10. – Полимерная труба оросителя градирни

1 – стенки, 2 – выступы, 3 – впадины, 4 – закругленные углы, 5 – узкие гофры, 6 – широкие гофры

Таким образом, рассмотренные в разделе 1.2 блоки оросителей градирен не все предусматривают интенсификаторы теплообмена для турбулизации воздушного потока. Учитывая, что основное сопротивление переносу теплоты сосредоточено в газовой фазе, такие интенсификаторы (выступы, просечки, лунки, накатки и т.д.) должны повышать тепловую эффективность охлаждения воды.

Исследованием и математическим моделированием процессов теплообмена в вентиляторных градирнях занимались многие российские и зарубежные ученые [52-69], что отмечено во введении к диссертационной работе. Методы математического моделирования гидромеханических и теплообменных процессов условно подразделяются на точные, асимптотические, численные и приближенные. Для определения эффективности

тепломассообмена в градирнях наибольшее применение получили численные и приближенные методы.

Следует отметить, что во второй половине прошлого столетия для расчета высоты блоков оросителей, при заданном гидравлическом и теплообменном режиме, в основном применялась модель идеального вытеснения фаз, что справедливо для контактных устройств без существенного обратного перемешивания потоков. С учетом обратного перемешивания теплоносителей стали применяться модели гидродинамической структуры потоков: диффузионная, ячеечная и комбинированные. Большой вклад в развитие этих моделей внес академик В.В. Кафаров с сотрудниками. В настоящее время, наряду с численными моделями, модели структуры потоков продолжают применяться в инженерных расчетах различных теплообменных и сепарационных аппаратов.

1.3. Экспериментальные и теоретические исследования процессов теплообмена в градирнях. Основные уравнения для расчета теплообмена в градирнях

Локальный поток теплоты (Вт) в элементарном объеме

$$dQ = \alpha_v(T_{ж} - T_{г})dV + I_{п}dL_u, \quad (1.1)$$

где α_v – объемный коэффициент теплоотдачи (Вт/(м³К)) в элементарном объеме dV ; $I_{п}$ – энтальпия пара, Дж/кг; L_u – массовый расход испарившейся жидкости, кг/с.

Количество испарившейся жидкости $dL_u = \beta_{xv}(C^* - C)dV$, β_{xv} – объемный коэффициент массоотдачи, кг/(м³с); Из приведенных выражений записывают

$$dQ = \alpha_v(T_{ж} - T_{г})dV + I_{п}\beta_{xv}(C^* - C)dV. \quad (1.2)$$

Уравнение теплового баланса противоточной градирни

$$Q = Lc_{pж}(T_{жн} - T_{жк}) + Q_u = G(I_{к} - I_{н}), \quad (1.3)$$

где L, G – массовый расход воды и воздуха, кг/с; $Q_u = c_{pж} T_{жк} G (C_k - C_H)$ – поток теплоты с испарившейся водой, Вт.

Тепловой баланс (1.3) на экспериментальной установке соблюдался с расхождением не более 3,5–5,0%.

На основе выражений (1.2), (1.3) с применением аналогии Льюиса записывается поток теплоты в градирне в известной форме

$$Q = G(I_k - I_H) = \beta_x F \Delta I_{ср}, \quad (1.4)$$

где $\Delta I_{ср}$ – средняя движущая сила процесса теплообмена, Дж/кг; β_x – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, кг/(м²с); F – площадь поверхности контакта фаз, м².

На основе уравнения (1.4) из эксперимента находится объемный коэффициент массоотдачи

$$\beta_{xv} = \frac{\beta_x F}{S_k H} = \frac{G(I_k - I_H)}{S_k H \Delta I_{ср}}, \quad (1.5)$$

где S_k – площадь поперечного сечения колонны, м²; H – высота слоя насадки, м; значение $\Delta I_{ср}$ записывается как среднее логарифмическое $\Delta I_{ср} = (\Delta I_{б} - \Delta I_{м}) / \ln(\Delta I_{б} / \Delta I_{м})$ при $\Delta I_{б} / \Delta I_{м} \geq 2$. При $\Delta I_{б} / \Delta I_{м} < 2$ – как среднее арифметическое $\Delta I_{ср} = 0,5 (\Delta I_{б} + \Delta I_{м})$. $\Delta I_{б} = I_k^* - I_k$; $\Delta I_{м} = I_H^* - I_H$ – большая и меньшая движущая сила теплообмена, Дж/кг.

Далее дан краткий обзор некоторых работ.

В статье [70] приведен расчет эффективности градирни с полимерными насадками при плёночном режиме течения жидкой фазы.

В статье [71] на основе уравнений энергии и Навье-Стокса при помощи численного решения моделируется трехмерное турбулентное течение воздушной фазы на поверхности в полимерном оросителе мини градирни.

В диссертации [72] рассмотрен вопрос улучшения процессов теплообмена обратных циклов производства посредством создания

конструкции оросителей из полимерных материалов, а также разработки методики их расчета.

В статье [73] предложена конструкция оросителя, представляющего собой регулярную насадку (рис. 1.11), выполненную в виде пустотелых труб, на которые на внешнем слое нанесено спиралеобразное углубление с сечением в виде прямоугольника. В данное углубление помещается эластичный жгут из капрона, закрепленный сверху и снизу трубы. Коэффициент турбулентного переноса определялся экспериментальным путем. Объемный коэффициент массоотдачи для градиен с насадками рассчитывался с использованием эмпирических выражений, полученных при воспроизведении реальных процессов на исследовательском стенде.

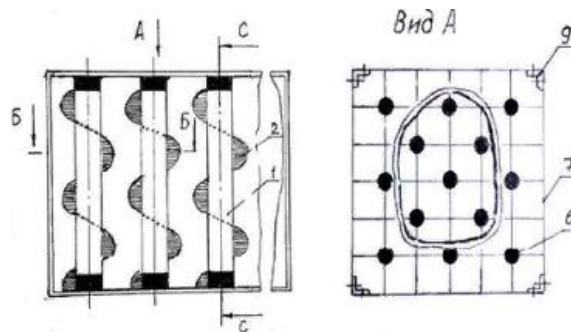


Рисунок 1.11. – Конструкция оросителя

В работе [74] отображена экспериментальная установка с корпусом из органического стекла с размерами поперечного сечения 0,6x0,6 м (рис. 1.12), на которой проводились исследования оросителей и водоуловителей с целью нахождения коэффициента аэродинамического сопротивления, его зависимости от объема жидкости и газа.

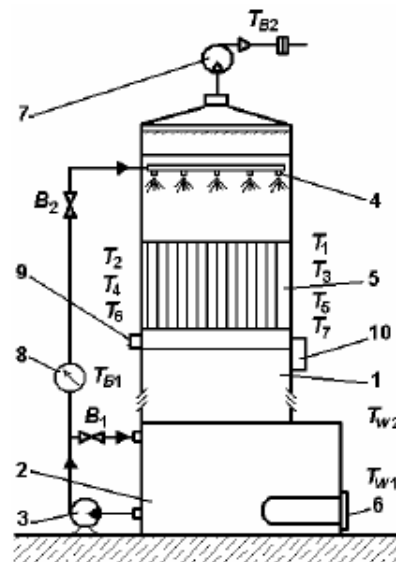


Рисунок 1.12. – Схема экспериментальной установки

1 – градирня; 2 – водосборный бак; 3 – насос; 4 – форсуночный аппарат; 5 – ороситель (4 лейки), 6 – водонагреватели; 7 – вентилятор; 8 – водомер; 9 – блок выключателей, 10 – приборы.

Результаты эксперимента приведены в табл. 1.7. и на рис. 1.13.

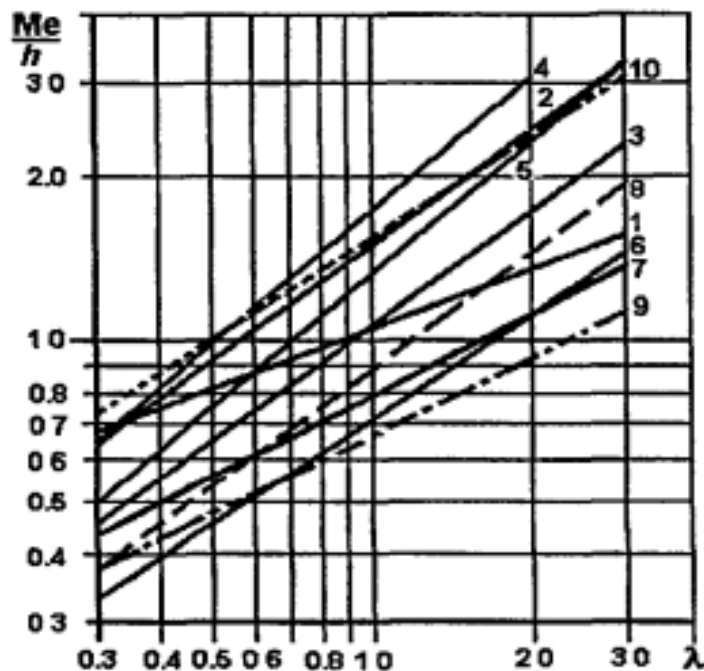


Рисунок 1.13. – Характеристики различных типов оросителей:

1- 10 – тип оросителя в соответствии с табл. 1.7.

Таблица 1.7. - Характеристики различных типов оросителей

№	Тип оросителя	h , м	A , л/м	m
1	ПР-50	1	1,05	0,36
2	Типа «Мунтерс»	0,5	1,516	0,71
3	Пленочный типа «косая волна»	1	1,072	0,71
4	2Н-ФК319(619)	0,6	1,05	0,82
5	Типа «косая волна»	2,4	2,97	0,82
6	Капельно-пленочный фирмы «Бальке-Дюрр»	1,5	0,717	0,65
7	Капельно-пленочный Нижнекамскнефтехим	1,4	0,8	0,5
8	Капельно-пленочный ООО «ТМИМ»	0,29	0,889	0,715
9		0,49	0,669	0,482
10	Пленочный ООО «ТМИМ» типа «косая волна»	0,22	1,56	0,628

В работе [75] проводились исследования установки по изучению гидродинамики трехфазного псевдооживленного слоя. Найдены численные зависимости высоты псевдооживленного слоя от плотности орошения для интенсификации охлаждения воды в испарительных охладителях. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.14.

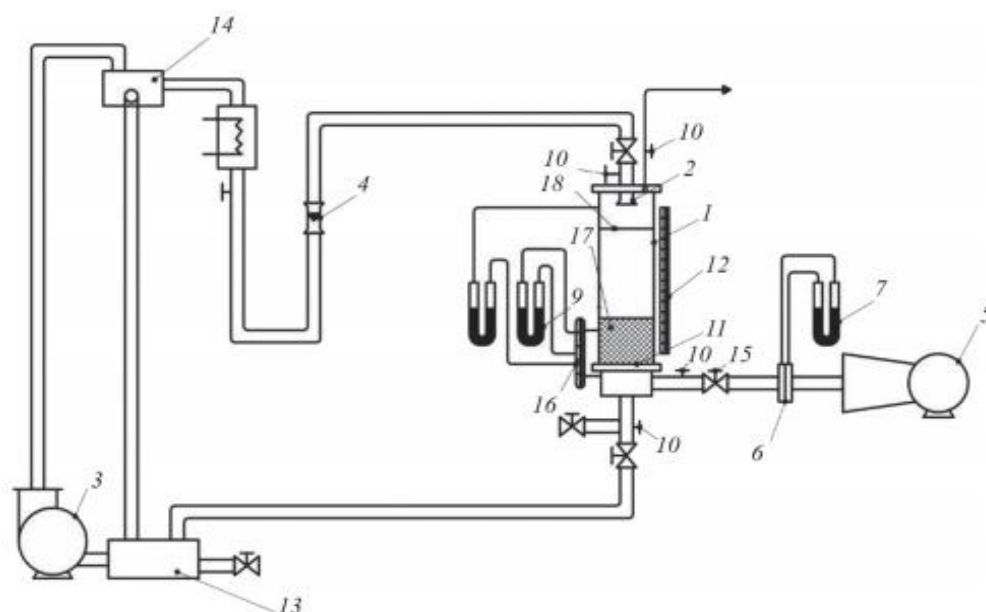


Рисунок 1.14. – Схема экспериментальной установки с рабочим участком (основной элемент):

1 – колонна; 2, 10 – системы подвода и отвода жидкости; 3 – насос; 4 – ротаметр; 5 – воздушный вентилятор; 6 – диафрагма; 7, 8, 9 – дифференциальные манометры; 11 – опорная решетка; 12 – мерная линейка; 13, 14 – сливной и напорный баки; 15 – поворотная заслонка; 16 – уровень жидкости; 17 – инертная насадка.

Экспериментальная установка состоит из колонны 1, систем подвода и отвода жидкости, подачи воздуха и контролирующих приборов. Диаметр рабочей зоны 104 мм, высота – 950 мм. В нижней части располагается опорная решетка 11, имеющая отверстия шириной 5 мм. На распределительной решетке располагается слой инертной насадки 17 – полые шары ($d = 14$ и 26 мм). Ожижающий газ – атмосферный воздух, который нагнетается при помощи вентилятора. На трубопроводе входа газа установлена стандартная диафрагма 6, дифференциальный манометр. Для регулировки расхода на трубопроводе подачи воздуха установлена поворотная заслонка 15. По высоте рабочего участка выставлена мерная линейка 12 для измерения высоты статического и динамического слоев насадки. В верхней части рабочего участка находится разбрызгивающее устройство. Вода в рабочий участок подается из напорного бака 14. На трубопроводе подачи воды установлен ротаметр, измеряющий расход жидкости. Вода из рабочего участка поступает в сливной бак 13. Воду в напорный бак подает насос 3. На рабочем участке установлены дифференциальные манометры 8, 9 для измерения гидравлического сопротивления опорной решетки, слоя насадки в состоянии покоя и в псевдоожигенном состоянии, а также для измерения полного гидравлического сопротивления аппарата.

Зависимость гидравлического сопротивления сухой решетки без насадки от скорости воздуха в аппарате показана на рис. 1.15.

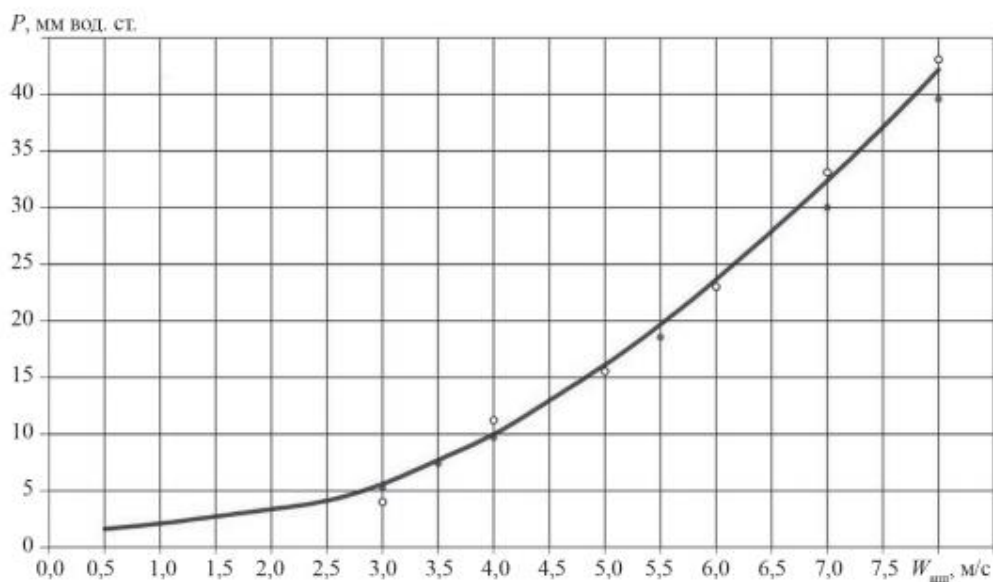


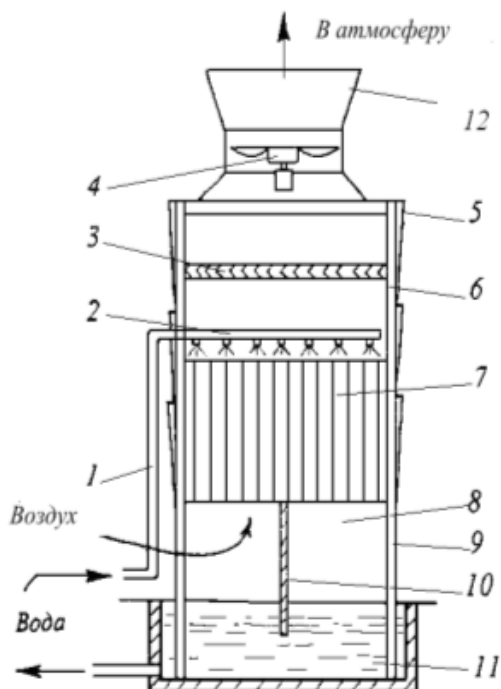
Рис. 1.15. - Зависимость гидравлического сопротивления сухой решетки без насадки от скорости воздуха в аппарате:

— — экспериментальные данные; • — данные по [76,77].

В работе [78] выполнены аналитические исследования работы вентиляторной градирни с оросителем пленочного типа. Построена математическая модель охлаждения воды атмосферным воздухом с учетом непосредственного контакта фаз в насадке. Выполнены расчеты эффективности охлаждения воды с применением эмпирических зависимостей для определения коэффициентов тепло- и влагообмена.

Схема установки, для которой было выполнено моделирование, приведена на рис. 1.16.

Рисунок 1.16. – Схема вентиляторной градирни



1 – подводящий трубопровод; 2 – водораспределительная система; 3 – каплеуловитель, 4 – вентилятор; 5 – обшивка; 6 – корпус градирни; 7 – ороситель; 8 – воздухораспределительное пространство; 9 – воздухоходные окна; 10 – ветровая перегородка; 11 – бассейн; 12 – диффузор

Осуществлялось построение аналитической модели тепло-массообменных процессов в системе вода-воздух в вентиляторной градирне с насадками пленочного типа выполнялось с учетом некоторых приближений [79].

Математическое моделированием процессов охлаждения воды в градирнях также рассмотрено в работах [80-86].

В работе [86] выполнен анализ существующих математических моделей тепломассообменных процессов. Приведены аргументы, доказывающие необходимость применения численных методов, в частности метода конечных элементов на основе разработанной математической модели (рис. 1.17). Результаты математической модели подтверждены экспериментальным путем.

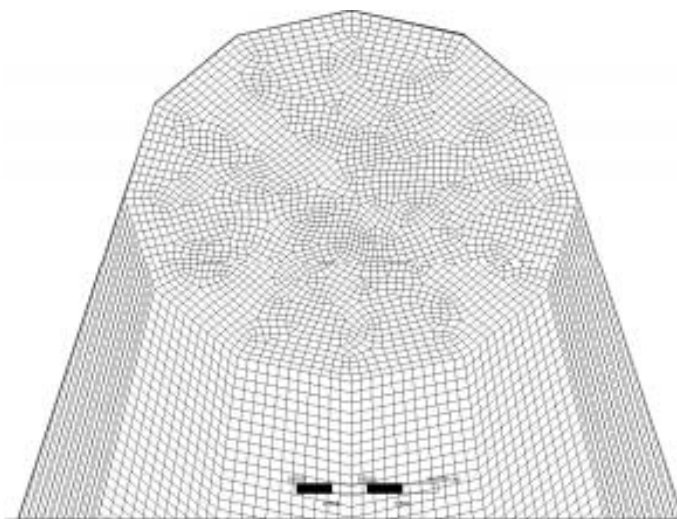


Рисунок 1.17. – Фрагмент трехмерной конечно-элементной модели градирни

В работах [87] рассмотрены причины ухудшения охлаждающей способности охладительного энергетического оборудования, приведены способы интенсификации тепломассообменных процессов. Выполнено математическое моделирование башенной испарительной градирни с учетом фазового перехода.

Требованиям адекватности, точности, достаточности учета конструктивных особенностей градирни наиболее отвечают модели, основанные на использовании численных методов, в частности метода конечных элементов (МКЭ). Примером пакетов программ для решения данных задач являются FLUENT, MSC/NASTRAN, ANSYS, FlowVision, Flow 3D и т.д.) [88-91].

Выводы

В данной главе рассмотрены модификации различных конструкций малогабаритных градирен, выполнен анализ имеющихся конструкций оросителей, изготовленных из полимерных материалов. Осуществлена оценка методов экспериментальных и теоретических исследований процессов тепломассообмена в градирнях, приведены результаты экспериментов различных авторов.

Следует вывод о том, что, несмотря на значительные успехи в области исследования градиен, требуется продолжение изучения теоретических и экспериментальных моделей градирни с комбинированными контактными устройствами.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛО – МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛЕНОЧНОЙ ГРАДИРНЕ С НАСАДКАМИ

В данной главе приведены 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 возможных неравномерностей распределения потоков воды и воздуха. Даны результаты расчетов эффективности теплообмена и сравнение с экспериментом. 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.

Введение

Охлаждение оборотной воды при непосредственном контакте с воздухом организуется в противоточных, вихревых, с перекрестным током, брызгальных и комбинированных градирнях. Эффективность процесса в градирне, как и в любом другом теплообменном аппарате большого размера, зависит от равномерности (однородности) распределения воды и воздуха в рабочем объеме, где происходит контакт фаз [92-95].

Наиболее эффективным является гидродинамический режим с идеальным вытеснением фаз, т.е. без перемешивания сред, без рецикла и байпаса.

При идеальном вытеснении обеспечивается максимальная движущая сила процесса межфазного переноса. В крупномасштабных градирнях, размеры которых могут достигать нескольких десятков метров, неизбежно возникают значительные неравномерности, особенно с боковыми окнами подачи воздуха по

периметру градирни. Даже в мини градирнях, с размерами 2-4 метра, неравномерности связаны с характеристиками вентиляторов для подачи воздуха и различным гидравлическим сопротивлением контактных устройств в центре и у стенок аппарата.

Если при предпроектных расчетах не учитывать эти явления, то определение режимных и конструктивных характеристик градирни может быть выполнено с большой погрешностью, как правило, завышающий тепловую эффективность по сравнению с реальной. Это приводит к недостаточному охлаждению воды и нарушению технологического режима работы установок на ТЭС и различных промышленных предприятий ТЭК и нефтехимии.

Целью данной главы является представление замкнутой системы дифференциальных уравнений тепло- и массообмена для пленочных блоков оросителей, которая позволяет в результате численного решения учесть неравномерность (неоднородность) распределения воды и воздуха по поперечному сечению градирни и определить эффективность охлаждения воды, а также разработка инженерных методов расчета градирен с учетом структуры потоков [96-99].

2.1. Численное моделирование эффективности теплообмена в пленочной градирне с учетом неоднородности распределения воды и воздуха

В пленочных блоках оросителей градирни, которые чаще всего представляют из себя структурированные насадки различной формы и размеров, происходит противоточное движение воды и воздуха [100-102]. Вода, подаваемая из форсунок в верхней части градирни, по возможности равномерно распределяется по блокам оросителей и стекает в виде пленок, струй (при малых плотностях орошения) и капель, которые не попали на поверхность блоков насадок. При плотности орошения $q_{ж} \geq 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$ и удельной поверхности блоков $a_v < 200 \text{ м}^2/\text{м}^3$, движение воды происходит преимущественно в пленках по поверхности насадок. Современные насадки могут иметь гофры, расположенные

под различным углом, просечки, волнистую и шероховатую поверхность, что повышает эффективность охлаждения воды. Скорость воздуха в блоках оросителей обычно находится в пределах от 0,8 до 2,5 м/с и при таком режиме, согласно известной классификации, происходит слабое взаимодействие фаз. Это означает, что гидродинамические характеристики пленки (скорость, толщина, касательное напряжение на стенке) очень слабо зависят от скорости воздуха.

Системы уравнений тепло- и массопереноса в двухфазных системах основываются на уравнениях однофазной гидродинамики и тепломассообмена. Точных решений уравнений переноса для двухфазных сред нет, всегда применяются различные допущения.

Один из подходов заключается в том, что дифференциальные уравнения тепло- и массопереноса записываются для каждой фазы отдельно с граничными условиями четвертого рода на межфазной поверхности [103]. При этом предполагается, что площадь межфазной поверхности известна, как и расположение границы раздела фаз в пространстве.

Этот подход применяется для пленочных аппаратов с прямыми каналами (трубками). В градирнях чаще применяются контактные устройства (их в энергетике называют блоками оросителей) более сложной геометрии, т.е. с волнистой поверхностью (гофрами), просечками, выступами, криволинейными каналами и т.д.

Таким образом, прямое численное решение системы уравнений с частными производными, записанными отдельно для каждой фазы, затруднительно. В таких случаях применяются модели с осреднением межфазных потоков по локальному объему, что значительно упрощает решение системы уравнений. Используется понятие объемных межфазных источников, которые связаны с коэффициентами переноса и движущими силами процессов. Дальнейшее упрощение подхода к моделированию связано с использованием моделей структуры потоков: диффузионной, ячеечной, а так же комбинированных. Однако необходимы экспериментальные исследования процессов в аппаратах и определение основных параметров моделей. Таким образом, различные

упрощения и допущения компенсируются экспериментальной информацией об объекте моделирования и обеспечивается приемлемая точность расчетов.

Для математического описания течений с пространственной поверхностью контакта газа и жидкости наибольшее применение получила модель раздельного движения фаз, или двухжидкостная модель [104-107]. В ней фазы рассматриваются как два взаимопроникающих и взаимодействующих континуума, заполняющих один и тот же объем. Фазы условно "размазываются" по объему, занятой газом и жидкостью. Фазы в каждой точке данного объема имеют свои средние скорости, температуру, концентрации и другие параметры. В такой постановке скорость движения фазы определяется как среднеобъемная скорость.

2.1.1. Система уравнений тепло - и массообмена

В данном разделе рассмотрен стационарный тепломассообмен при противотоке пленки воды и воздуха в регулярной насадке.

Законы сохранения импульса, массы и теплоты для блоков оросителей записываются для физически малого объема отдельно для каждой фазы с источниковыми членами, учитывающими обмен импульсом, массой и теплотой между фазами выделенного объема, т.е. с объемными источниками межфазного переноса.

В рассмотренной постановке система дифференциальных уравнений переноса в цилиндрической системе координат (рис. 2.1) при условно равномерной подаче воды и воздуха для блоков оросителей в градирне запишется в форме, представленной ниже.

На рис. 2.1. показаны равномерные профили скорости воды и воздуха на входе в блок оросителей. По мере движения фаз возможны различные неоднородности, рассмотренные далее.

Причем движение пленки происходит в ламинарном волновом или турбулентном режиме, а движение газа в турбулентном, при $Re_1 > 2300$, а с

интенсификаторами $Re_r > (500-1000)$. Оценка режимов дана в разделе 2.1.2. В ядре газовой фазы принимается модель однородной изотропной турбулентности, предложенная Д. Тейлором и далее развита А. Н. Колмогоровым, А.М. Обуховым и др. Коэффициент турбулентного обмена принимается постоянным за пределами пограничного слоя, расположенного на межфазной поверхности пленки (гипотеза замороженной турбулентности).

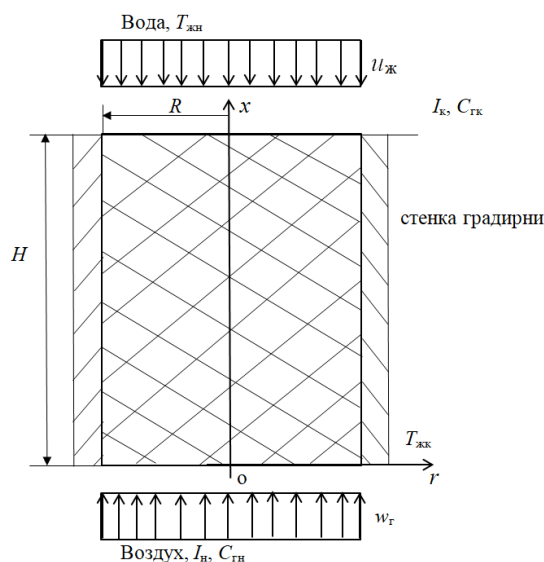


Рисунок 2.1. – Схема блока оросителей градирни (регулярной насадки)

Далее записана система дифференциальных уравнений в цилиндрической системе координат для блока оросителей (рис. 2.1), где конструктивные характеристики насадки и межфазный перенос учитываются при расчете параметров источниковых членов и коэффициентов турбулентного обмена, что является упрощенным частным случаем модели многоскоростного континуума.

Целью моделирования является определение профилей температур в фазах и расчет тепловой эффективности охлаждения воды в градирне.

Допущения к модели:

1) Точное описание явлений переноса импульса, массы и энергии на уровне отдельных фаз в хаотичной насадке или в регулярной с интенсификаторами крайне затруднительно вследствие ряда неизвестных локальных величин. К тому же такая информация о локальных характеристиках двухфазной среды при решении задач модернизации или проектирования аппарата является ненужной,

так как практически используется информация по осредненным величинам и поэтому математическое описание построено при применении осредненных величин по локальному объему.

2) Принимается, что осредненные величины по локальному объему практически постоянны в пределах этого объема.

3) Предполагается, что размер неоднородностей в рассматриваемой двухфазной среде газ – жидкость существенно больше молекулярно-кинетических размеров, т.е. неоднородности содержат очень большое число молекул. Это условие в модели многоскоростного континуума позволяет применять обычные уравнения и методы механики сплошной среды [106].

4) Каждая фаза заполняет одновременно один и тот же объем и имеет собственные осредненные характеристики (плотность, скорость, концентрацию, температуру и т.д.).

Рассмотренный выше подход (модель) в упрощенном виде применяется при математическом моделировании процессов в промышленных ректификационных и абсорбционных колоннах с насадками и барботажными тарелками, в скрубберах охлаждения и очистки газов при непосредственном контакте с жидкостью, в жидкостных экстракторах и других технологических устройствах [105, 107-111].

Ниже записана система уравнений теплообмена и массообмена для вычисления полей температур и влагосодержания в противоточной пленочной градирне в ядре потоков воды и воздуха [96].

Уравнение конвективного теплообмена в жидкой фазе

$$\rho_{\text{ж}} c_{\text{рж}} u_{\text{ж}}(r) \frac{\partial T_{\text{ж}}}{\partial x} = (\lambda_{\text{тж}} + \lambda_{\text{ж}}) \frac{\partial^2 T_{\text{ж}}}{\partial x^2} + \frac{(\lambda_{\text{тж}} + \lambda_{\text{ж}})}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T_{\text{ж}}}{\partial r} \right] + R_{\text{т}}, \quad (2.1)$$

где $u_{\text{ж}}(r)$ - скорость жидкости (воды), как функция радиальной координаты, м/с; $T_{\text{ж}}$ - температура жидкости °С, $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости, кг/м³; $c_{\text{рж}}$ - удельная теплоемкость жидкости, Дж/кгК; $\lambda_{\text{тж}}, \lambda_{\text{ж}}$ - коэффициент турбулентной и молекулярной теплопроводности жидкости, Вт/мК; x, r - вертикальная и

радиальная координаты, м (рис. 2.1); R_T - объемный межфазный источник теплопередачи, Вт/м³.

Размерность членов в уравнении (2.1), Вт/м³.

Уравнение конвективного теплообмена в газовой фазе

$$\rho_{\Gamma} w_{\Gamma}(r) \frac{\partial I}{\partial x} = (\lambda_{\text{ТГ}} + \lambda_{\Gamma}) \frac{\partial^2 T_{\Gamma}}{\partial x^2} + \frac{(\lambda_{\text{ТГ}} + \lambda_{\Gamma})}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial r} \right] - R_T, \quad (2.2)$$

где $w_{\Gamma}(r)$ - скорость газа (воздуха), как функция координаты, м/с; T_{Γ} - температура газа, °С; I - удельная энтальпия газа, Дж/кг ($I = f(T_{\Gamma}, C_{\Gamma})$); ρ_{Γ} - плотность газа, кг/м³; $\lambda_{\text{ТГ}}$ - коэффициент турбулентной теплопроводности газа, Вт/мК; λ_{Γ} - коэффициент молекулярной теплопроводности газа, Вт/мК.

Размерность членов в уравнении (2.2), Вт/м³.

Уравнение конвективного массообмена влаги в газовой фазе

$$w_{\Gamma}(r) \frac{\partial C_{\Gamma}}{\partial x} = (D_{\text{ТГ}} + D_{\Gamma}) \frac{\partial^2 C_{\Gamma}}{\partial x^2} + \frac{(D_{\text{ТГ}} + D_{\Gamma})}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial C_{\Gamma}}{\partial r} \right] - R_M, \quad (2.3)$$

где C_{Γ} - влагосодержание газа, кг/кг; $D_{\text{ТГ}}$ - коэффициент турбулентной диффузии в газовой фазе, м²/с; D_{Γ} - коэффициент молекулярной диффузии влаги в газовой фазе, м²/с; R_M - объемный межфазный источник переноса влаги, с⁻¹.

Размерность членов в уравнении (2.3), с⁻¹.

Коэффициентами молекулярной диффузии D_{Γ} и теплопроводности λ_{Γ} в уравнениях (2.2) и (2.3) можно пренебречь, т.к. в ядре потока $D_{\text{ТГ}} \gg D_{\Gamma}$ и $\lambda_{\text{ТГ}} \gg \lambda_{\Gamma}$.

Граничные условия к уравнениям (2.1) - (2.3)

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

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

Плотность потока теплоты q (Вт/м²) записывается по выражению

$$q = \alpha_{\text{ж}}(T_{\text{ж}\infty} - T_{\text{жгр}}) = \alpha_{\text{г}}(T_{\text{жгр}} - T_{\text{г}}) + I_{\text{п}}\beta_{\text{х}}(C_{\text{г}}^* - C_{\text{г}}), \quad (2.4)$$

где $C_{\text{г}}^*$ - влагосодержание насыщенного газа, кг/кг; $\alpha_{\text{ж}}$ - коэффициент теплоотдачи в жидкой фазе, Вт/м²К; $\beta_{\text{х}}$ - коэффициент массоотдачи в газовой фазе, отнесенной к разности влагосодержаний, кг/м²с; $I_{\text{п}}$ - энтальпия водяного пара, Дж/кг; $\alpha_{\text{г}}$ - коэффициент теплоотдачи в газовой фазе, Вт/м²К; нижние индексы: ∞ - в ядре фазы; гр – на границе раздела фаз.

Учитывая, что основное сопротивление тепломассообмену при охлаждении воды сосредоточено в газовой (воздушной) фазе, применяют аналогию Льюиса и поток тепла записывают в форме [8]

$$q = \beta_{\text{х}} \left[c_{\text{рг}}(T_{\text{ж}} - T_{\text{г}}) + I_{\text{п}}(C_{\text{г}}^* - C_{\text{г}}) \right], \quad (2.5)$$

где; $c_{\text{рг}}$ - теплоемкость влажного воздуха, Дж/кг К.

С применением известных зависимостей для $c_{\text{рг}}$, $I_{\text{п}}$, I в итоге плотность потока теплоты записывается по выражению [108]

$$q = \beta_{\text{х}}(I_{\text{гр}} - I), \quad (2.6)$$

где $I_{\text{гр}}$ - энтальпия воздуха на границе с жидкой фазой, Дж/кг; $\beta_{\text{х}}$ – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержания, кг/(м²с).

Тогда выражение для локального межфазного источника теплоты в уравнениях (2.1), (2.2) получит вид

$$R_{\text{т}} = \frac{qdF}{dV} = \frac{\beta_{\text{х}}(I_{\text{гр}} - I)dF}{dV}, \quad (2.7)$$

где dF - площадь межфазной поверхности в элементарном объеме dV , $dF/dV = da_{\text{в}}$ - локальная удельная поверхность контакта фаз, м²/ м³.

Плотность потока массы влаги в воздухе по уравнению массоотдачи

$$j = \beta_{\Gamma} (C_{\Gamma}^* - C_{\Gamma}), \quad (2.8)$$

где β_{Γ} - коэффициент массоотдачи в газовой фазе, м/с.

Межфазный источник переноса влаги в воздухе в уравнении (2.3) получит форму

$$R_{\text{м}} = \frac{j dF}{dV} = \frac{\beta_{\Gamma} (C_{\Gamma}^* - C_{\Gamma}) dF}{dV}. \quad (2.9)$$

В численном решении системы уравнений переноса (2.1) - (2.3) с источниками (2.7) - (2.9) используются следующие известные зависимости, характеризующие свойства влажного воздуха

$$c_{\text{рГ}} = c_{\text{рсв}} + c_{\text{рп}} C_{\Gamma}, \quad (2.10)$$

где $c_{\text{рсв}}$ - теплоемкость сухого воздуха, Дж/кгК; $c_{\text{рп}}$ - теплоемкость водяного пара, Дж/кгК.

Энтальпия на границе раздела

$$I_{\text{гр}} = c_{\text{рсв}} T_{\text{ж}} + (R_{\text{о}} + c_{\text{рп}} T_{\text{ж}}) C_{\Gamma}^*, \quad (2.11)$$

где $R_{\text{о}}$ - удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Энтальпия в ядре газовой фазы

$$I = c_{\text{рсв}} T_{\Gamma} + (R_{\text{о}} + c_{\text{рп}} T_{\Gamma}) C_{\Gamma}. \quad (2.12)$$

Таким образом, система уравнений (2.1) - (2.3) с граничными условиями и с учетом выше приведенных зависимостей является замкнутой и может решаться численными методами при известных функциях профилей скоростей $u_{\text{ж}}(r)$ и $w_{\Gamma}(r)$, коэффициентов массоотдачи и турбулентного обмена.

В первом приближении при равномерных подачах воды и воздуха в блоки регулярных насадок можно принять $u_{\text{ж}}(r) = u_{\text{ж}}$, $w_{\Gamma}(r) = w_{\Gamma}$; где $u_{\text{ж}}$, w_{Γ} - средние скорости воды и воздуха в блоках, м/с. С учетом неравномерностей профили скоростей находятся экспериментально или задаются. При различном

гидравлическом сопротивлении зон градирни можно использовать выражение Бермана (далее выражение 2.29)).

2.1.2. Параметры математической модели

Сделаем оценку режимов течения пленки воды по регулярным насадкам и движения воздуха в каналах, образованными насадочными элементами.

Режим течения пленки воды зависит от плотности орошения и геометрического параметра насадки, который связан с удельной поверхностью и свободным объемом.

Плотность орошения в промышленных градирнях обычно составляет 7-15 м³/(м²час), а в мини градирнях доходит до 40 м³/(м²час).

Число Рейнольдса для пленочного течения записывается как $Re_{ж} = 4\overline{q_{ж}} / v_{ж}$, где $\overline{q_{ж}}$ - плотность орошения к периметру пленочного течения, м³/(м сек). Для насадок применяется, $Re_{ж} = 4q_{ж} / (a_v v_{ж})$, где $q_{ж}$ - плотность орошения к площади сечения аппарата, м³/(м²сек). Данные формы записи чисел $Re_{ж}$ для пленочных аппаратов равнозначные. Тогда, например, при максимальной плотности орошения 40 м³/(м²час) или 0,0111 м³/(м²сек) и удельной поверхности насадки $a_v = 100 \text{ м}^2/\text{м}^3$ при средней температуре воды 35°С, получаем $Re_{ж} = 600$. Очевидно, что при уменьшении плотности орошения число Рейнольдса снижается пропорционально и при $q_{ж} = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$ равно $Re_{ж} = 150$. Известно, что турбулентный режим течения пленки начинается при $Re_{ж} > 1600$. Отсюда сделанные оценки показывают, что режим течения пленки в блоках оросителей градирен – ламинарный волновой. Тогда уравнение теплообмена (2.1) в жидкой фазе упрощается, так как $\lambda_{тж} = 0$.

В газовой фазе для оценки режима применяется число Рейнольдса $Re_{г} = w_{г} d_{э} / v_{г}$, где $w_{г}$ – средняя скорость газа в блоках, м/с; $d_{э} = 4\varepsilon_{св} a_v$ – эквивалентный диаметр насадки, м. Скорость воздуха в градирне находится в пределах $w_{г} = 0,8-2,5 \text{ м/с}$. Для насадки с $a_v = 100 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и $\varepsilon_{св} = 0,9 \text{ м}^3/\text{м}^3$ имеем

$d_3 = 0,036$ м. При $w_T = 0,8$ м/с имеем $Re_3 = 1800$, при $w_T = 2,5$ м/с $Re_3 = 5450$. Отсюда можно сделать вывод, что турбулентный режим в регулярных насадках начинается при $w_T > 1,1$ м/с. Однако, этот вывод справедлив для гладких прямых каналов для однофазных сред, т.е. без противотока с пленкой жидкости. В промышленных градирнях практически всегда применяются контактные устройства с поверхностными интенсификаторами (волны, выступы, просечки, гофры и т.д.), которые обеспечивают дополнительную турбулизацию воздуха. Например, согласно исследованию вязких сред, поверхностные интенсификаторы турбулизуют поток уже при $Re_{ж} > (300-500)$ [112, 113], что дает основание считать, что режим движения воздуха при $w_T > 0,8$ м/с – турбулентный. Тогда в уравнениях (2.2) и (2.3) необходимо определение коэффициентов турбулентного обмена.

Коэффициенты турбулентной теплопроводности и диффузии в ядре потока газовой фазы, согласно модели Тейлора, принимаются постоянными и близкими к значению коэффициента турбулентной вязкости $\nu_{ТГ}$ (м²/с) среды

$$\lambda_T \approx \rho_T c_{pT} \nu_{ТГ}; D_T \approx \nu_{ТГ}, \quad (2.13)$$

где средний коэффициент $\nu_{ТГ}$ для насадочного слоя в ядре газовой фазы вычисляется по формуле [111]

$$\nu_{ТГ} = 3,87 \nu_T \sqrt{\xi_{оп} Re_3}, \quad (2.14)$$

где $Re_3 = w_T d_3 / \nu_T$ - число Рейнольдса для насадки; d_3 - эквивалентный диаметр насадки, м; $\xi_{оп}$ - коэффициент гидравлического сопротивления орошаемого насадочного слоя; ν_T - коэффициент кинематической вязкости газа, м²/с.

Для регулярных насадок (плоскопараллельных, трубчатых и др.) при движении газа в противотоке с пленкой жидкости коэффициенты тепло- и массоотдачи можно вычислить с применением развития гидродинамической аналогии переноса по формулам ($Re_3 > 3000$ для гладких насадок, при $Re_3 > 1000$ – с интенсификаторами) [114, 115]

$$Nu_3 = 0,158 Re_3^{0,85} \left(\xi_{оп} / 8 \right)^{0,429} Pr_T^{0,33}, \quad (2.15)$$

$$Sh_3 = 0,158 Re_3^{0,85} \left(\xi_{op} / 8 \right)^{0,429} Sc_{\Gamma}^{0,33}, \quad (2.16)$$

где $Nu_3 = \alpha_{\Gamma} d_3 / \lambda_{\Gamma}$ - число Нуссельта; $Sh_3 = \beta_{\Gamma} d_3 / D_{\Gamma}$ - число Шервуда; $Pr_{\Gamma} = \nu_{\Gamma} / a_{\Gamma}$ - число Прандтля; $Sc_{\Gamma} = \nu_{\Gamma} / D_{\Gamma}$ - число Шмидта; $a_{\Gamma} = \lambda_{\Gamma} / \rho_{\Gamma} c_{p\Gamma}$ - коэффициент температуропроводности газа, м²/с.

Для нерегулярных насадок с применением двухслойной модели турбулентного пограничного слоя получено ($Re_3 > 40$) [114]

$$Nu_3 = 0,175 Re_3^{0,75} \left(\xi_{op} / 2 \right)^{0,25} Pr_{\Gamma}^{0,33}, \quad (2.17)$$

$$Sh_3 = 0,175 P \varepsilon_3^{0,75} \left(\xi_{op} / 2 \right)^{0,25} Sc^{0,33}. \quad (2.18)$$

Выражения (2.17), (2.18) также применяется для регулярных насадок с интенсификаторами процессов (просечки, гофры, выступы, лепестки и др.), которые обеспечивают значительную турбулизацию газового потока.

Коэффициент гидравлического сопротивления в выражениях (2.14) – (2.18) зависит от конструкции насадки и режима работы и связан с перепадом давления орошаемого слоя зависимостью $\xi_{op} = 2d_3 \Delta P_{op} / (\rho_{\Gamma} H w_{\Gamma}^2)$, где ΔP_{op} - перепад давления, Па. Значение коэффициента ξ_{op} обычно вычисляется с применением эмпирических зависимостей $\xi_{op} = f(Re_3, q_{ж})$ для каждой конструкции насадки [53, 125].

Выражение (2.14) для коэффициента турбулентной вязкости и формулы (2.15) - (2.18) для чисел Нуссельта и Шервуда позволяют вычислить локальные значения ν_{Γ} , β_{Γ} , α_{Γ} , по поперечному сечению блоков оросителей в зависимости от режимных, конструктивных параметров, гидравлического сопротивления и теплофизических свойств воздуха.

Тогда локальные коэффициенты в локальном объеме тепло- и массоотдачи с применением (2.15) и (2.16) запишутся в форме

$$\alpha_{\Gamma} = 0,158 \frac{\lambda_{\Gamma}}{d_3} da_{\nu} Re_3^{0,85}(r) \left[\frac{\xi_{op}(r)}{8} \right]^{0,429} Pr_{\Gamma}^{0,33}, \quad (2.19)$$

$$\beta_{\Gamma} = 0,158 \frac{D_{\Gamma}}{d_{\Xi}} da_{\nu} Re_{\Xi}^{0,85}(r) \left[\frac{\xi_{\text{оп}}(r)}{8} \right]^{0,429} Sc_{\Gamma}^{0,33}. \quad (2.20)$$

Аналогичные выражения можно записать по формулам (2.17),(2.18).

Локальный коэффициент турбулентный вязкости как функция от r

$$\nu_{\text{ТГ}}(r) = 3,87\nu_{\Gamma} \sqrt{\xi_{\text{оп}}(r) Re_{\Xi}(r)}. \quad (2.21)$$

Удельная поверхность контакта фаз в локальном объеме блока оросителей $da_{\nu} = a_{\nu} \psi_w(r)$, где $\psi_w(r)$ - локальный коэффициент смачиваемости поверхности, зависит от плотности орошения. Для регулярных насадок при $a_{\nu} < 150 \text{ м}^2/\text{м}^3$ приближенно вычисляется по известной формуле [116]

$$\psi_w = \frac{q_{\text{ж}}}{0,0005 + 0,8q_{\text{ж}}}, \quad (2.22)$$

где $q_{\text{ж}}$ имеет размерность $\text{м}^3/(\text{м}^2 \text{ с})$. При $q_{\text{ж}} > 0,0025$, имеем $\psi_w \approx 1$.

Определение коэффициента смачиваемости поверхности насадок представляет довольно сложную задачу и рассмотрено в работах [116, 117] и других.

2.1.2. Моделирование физических полей с учетом неравномерностей распределения фаз

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 метров, то 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 (рис. 2.2).

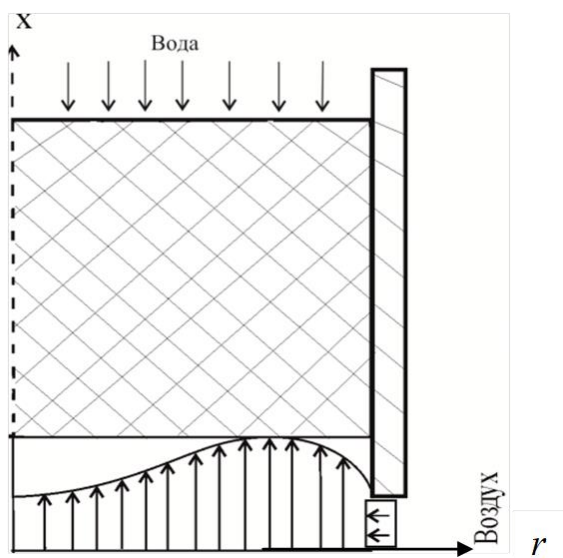


Рисунок 2.2. – Примерный профиль скорости воздуха в градирне

Такие неравномерности являются одной из основных причин снижения эффективности теплообмена [92, 93, 95, 105, 118-121]. Математические модели и расчетные выражения для вычисления профиля скорости воздуха, в зависимости от условий подачи и различного гидравлического сопротивления слоя насадки от стенок к центру, даны в работах [93, 117, 118, 102, 121, 122-126]. Далее путем численного решения системы уравнений (2.1) - (2.3) показано, как зависит тепловая эффективность охлаждения воды от неравномерности распределения воздуха и воды при заданном профиле скорости.

2.1.3. Численное решение системы уравнений теплообмена

Для решения представленной системы уравнений (2.1) - (2.3) с частными производными и межфазными источниками переноса теплоты и массы могут применяться различные методы, которые все являются итерационными. Данные уравнения запишем в конечных разностях для насадочного слоя (рис. 2.3). При этом учтем, что основное сопротивление теплопередачи сосредоточено в

газовой (воздушной) фазе, что дает основание записать уравнение (2.1) переноса теплоты в пленке жидкости в виде уравнения баланса $Lc_{\text{рж}}dT_{\text{ж}} = Gdl$.

Уравнения переноса теплоты и массы влаги записывается в конечных разностях для ячеек области решения, т.е. для блока оросителей (рис. 2.1). Для удобства решения система уравнений представляется в декартовой системе координат для ячеек (рис. 2.3).

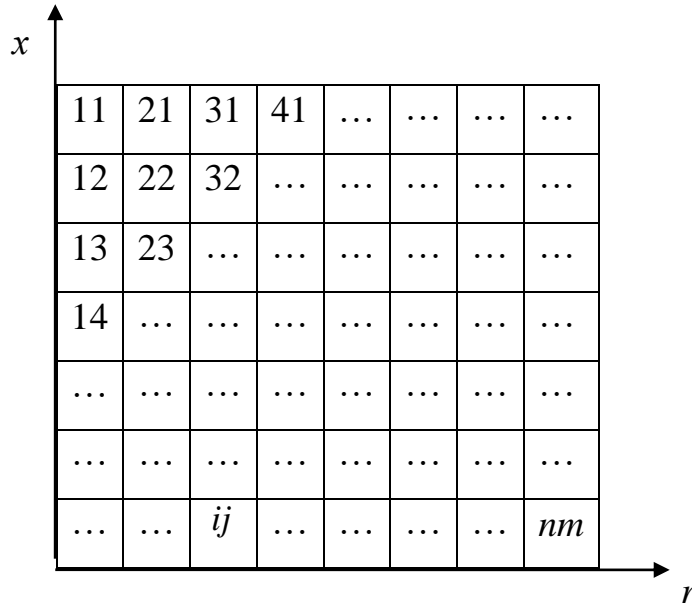


Рисунок 2.3. – Условное разбиение насадочного слоя на ячейки
(nm – число ячеек)

Уравнение (2.2) в конечных разностях:

$$\rho_{\Gamma} w_{\Gamma ij} \frac{I_{ij} - I_{i-1,j}}{a_{ij}} = \lambda_{\Gamma ij} \frac{T_{\Gamma i+1,j} - 2T_{\Gamma ij} + T_{\Gamma i-1,j}}{a_{ij}^2} + \lambda_{\Gamma ij} \frac{T_{\Gamma i+1,j} - 2T_{\Gamma ij} + T_{\Gamma i-1,j}}{b_{ij}^2} + R_{\Gamma ij}, \quad (2.23)$$

где $i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$.

Уравнение (2.3) в конечных разностях:

$$w_{\Gamma ij} \frac{C_{ij} - C_{i-1,j}}{a_{ij}} = D_{\Gamma ij} \frac{C_{\Gamma i+1,j} - 2C_{\Gamma ij} + C_{\Gamma i-1,j}}{a_{ij}^2} + D_{\Gamma ij} \frac{C_{\Gamma i+1,j} - 2C_{\Gamma ij} + C_{\Gamma i-1,j}}{b_{ij}^2} + R_{\Gamma ij}, \quad (2.24)$$

где a_{ij}, b_{ij} – размеры ячеек.

Уравнение баланса теплоты в ячейке:

$$Q_{ij} = G_{ij} (I_{ij} - I_{i,j-1}) = L_{ij} c_{\text{рж}} (T_{ij} - T_{i,j+1}). \quad (2.25)$$

где $i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$.

Решение системы уравнений (2.23)-(2.24) должно удовлетворять уравнению баланса теплоты в интегральном виде, т.е. для всей градирни

$$Q = G(I_k - I_n) = LC_{pж}(T_{жн} - T_{жк}). \quad (2.26)$$

Система уравнений решается методом прогонки с релаксацией. Число ячеек nm выбирается исходя из условия, что дальнейшее сгущение сетки (т.е. увеличение числа ячеек) не приводит к существенному изменению результатов по полям температур в фазах. Например, для расчетной области площадью $1,0 \text{ м}^2$ достаточно $nm = 10^5$.

Источники теплоты (2.7) и массы (2.9) вычисляются для каждой ячейки, аналогично и коэффициенты турбулентного обмена (2.13) с локальными значениями гидравлического сопротивления ячеек.

Для проверки адекватности математической модели первоначально выполнена проверка выражений для коэффициентов массоотдачи в градирнях с экспериментальными данными из работ [102, 127], где исследовался макет градирни из оргстекла диаметром $0,2 \text{ м}$ и с высотой регулярных насадок $H = 0,4 \text{ м}$ из сетчатых полиэтиленовых трубок диаметром $0,05 \text{ м}$. Также дано сравнение для процесса увлажнения воздуха водой в рулонной металлической насадке [108, 128].

На рисунке 2.4 представлены экспериментальные и расчетные данные по среднему объемному коэффициенту массоотдачи $\beta_{vx} = \beta_T \rho_T a_v \psi_w$ для сетчатой полиэтиленовой насадки ($a_v \approx 140 \text{ м}^2/\text{м}^3$), а на рисунке 2.5 - для регулярной рулонной насадки из металлической ленты с лепестками ($a_v \approx 480 \text{ м}^2/\text{м}^3$) [8]. Из рисунков следует удовлетворительное согласование результатов расчетов с экспериментом при различных плотностях орошения и скорости воздуха. Следует отметить, что рулонная металлическая насадка с большой удельной поверхностью с повышенной турбулизацией газа может применяться в мини градирнях.

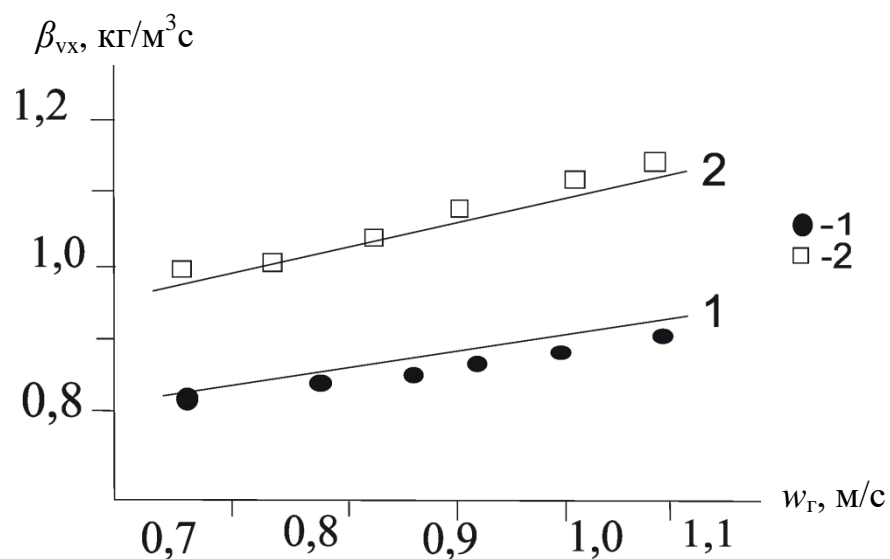


Рис 2.4.-Зависимость коэффициента массоотдачи от скорости воздуха: 1,2 – расчет по формуле (2.16). 1 – расход воды 4,9 м³/(м² час); 2 – 7,0 м³/(м² час); точки – эксперимент [102, 127].

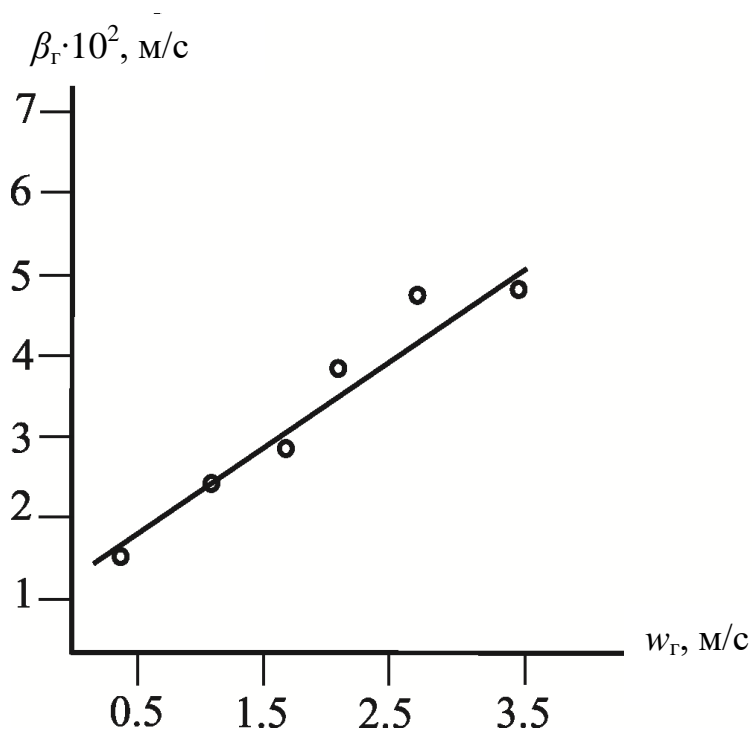


Рисунок 2.5 - Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой фазе от скорости газа при плотности орошения 10 (м³/м² ч), $d_э = 0,0079$, м; \circ - эксперимент [108, 128], линия - расчет по формуле (2.18).

Для проверки адекватности математической модели на рисунке 2.6. даны результаты расчетов тепловой эффективности и сравнение с экспериментальными данными для макета градирни с высотой насадки $H=0,4$ м. Температура воды на входе $T_{\text{ЖН}} = 32^\circ\text{C}$; температура воздуха $T_{\text{ГН}} = 25^\circ\text{C}$. Профили скоростей равномерные.

Тепловая эффективность охлаждения воды вычисляется по отношению

$$E_{\text{ж}} = \frac{T_{\text{ЖН}} - T_{\text{ЖК}}}{T_{\text{ЖН}} - T_{\text{МТ}}}, \quad (2.27)$$

где $T_{\text{МТ}}$ – температура мокрого термометра, $^\circ\text{C}$.

На рис. 2.6 даны результаты расчета $E_{\text{ж}}$ (2.27), где температура на выходе $T_{\text{ЖК}}$ находилась из численного решения системы уравнений (2.23) - (2.25) при условном равномерном распределении фаз.

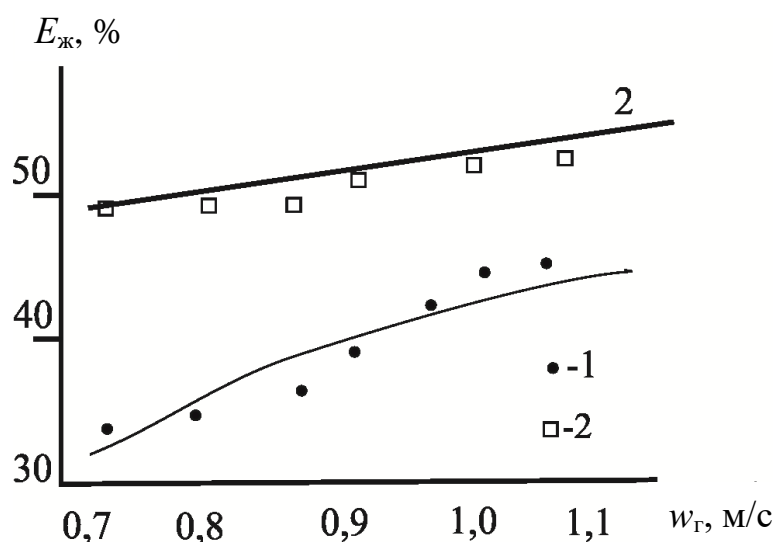


Рисунок 2.6. - Зависимость тепловой эффективности охлаждения воды (2.23) от скорости воздуха на макете градирни с полиэтиленовыми сетчатыми насадками ($a_{\text{в}} \approx 140 \text{ м}^2/\text{м}^3$); 1 - расход воды $7,61 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 2- $4,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; точки эксперимент [102, 127]; линии – расчет.

Получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных результатов по тепловой эффективности охлаждения воды на макете градирни диаметром 0,2 м [102, 127].

Рассмотрены два случая неравномерностей.

1. Неравномерный профиль скорости воздуха на входе в слой блоков оросителей, который сохраняется или незначительно изменяется по мере движения воздуха в орошаемых блоках регулярных насадок. Неравномерность профиля скорости при подаче воды в верхней части градирни возникает из-за неудовлетворительной работы форсунок.

Если профиль скорости воздуха можно определить путем численного решения системы дифференциальных уравнений движения или экспериментально, а также по выражению Бермана, связывающего скорость воздуха с перепадом давления по зонам градирни, то неравномерность подачи воды имеет случайный характер и может быть определена экспериментально или иными косвенными методами.

2. Неравномерный профиль скорости воздуха и распределение воды.

На рис. 2.7 даны безразмерные профили температуры воды по зонам градирни, полученные из численного решения системы уравнений (2.1) – (2.3).

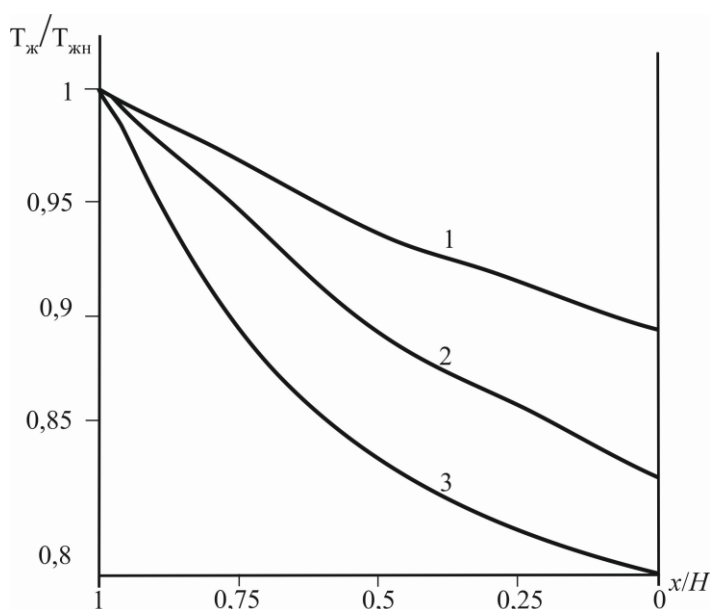


Рисунок 2.7. - Безразмерный профиль температуры воды по высоте регулярной насадки из полимерных труб ($a_v=110$ м²/м³, $H=1,0$ м) при различных скоростях воздуха в зонах градирни. 1 – скорость в центре градирни $w_r=0,8$ м/с; 3 – скорость в зоне у стенки $w_r=2,25$ м/с; 2 – средняя скорость $w_r=1,5$ м/с; $q_{ж} = 8,8$ м³/м²час). При $x/H = 1,0$ вход воды.

Из численного моделирования следует, что в центре градирни, где скорость воздуха меньше чем у стенки, вода охлаждается с меньшей эффективностью.

В результате расчетов промышленной градирни установлено, что при равномерном орошении насадки водой из-за неравномерности подачи воздуха снижение теплового КПД (2.28) может составлять на 5-30% и более.

На рисунке 2.8 представлены результаты расчетов эффективности (2.27) по зонам промышленной градирни диаметром 20 м (СК-400) при равномерной подаче воды и неравномерного профиля скорости воздуха $w_r(r)/w_r$, где w_r - средняя скорость на все сечение градирни. Из рис. 2.8 видно, что наименьшее значение эффективности наблюдается при $w_r(r)/w_r < 1$, т.е. в зонах с пониженной скоростью воздуха. Расчеты показывают, что при равномерной подаче фаз ($q_{ж} = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, $w_r = 1,5 \text{ м/с}$) значение $E_{ж} = 0,44$. При наличии неравномерностей осредненное КПД для всей градирни составляет $E_{ж} = 0,32$, т.е. снижается почти на 35% относительных.

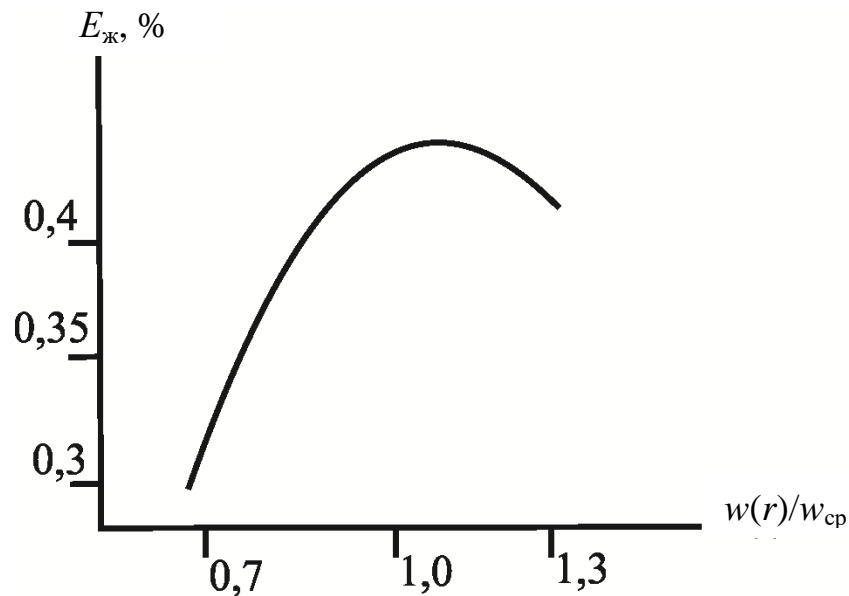


Рисунок 2.8. - Зависимость тепловой эффективности от неравномерности распределения скорости воздуха. Расход в центре $15 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, в зонах у стенки. $q_{ж} = 5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$. Сетчатая полиэтиленовая и насадка с удельной поверхностью $a_v = 140 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и высотой блоков насадки $H = 1,5 \text{ м}$.

Расчет средней эффективности (2.27) при наличии неравномерностей выполняется с осредненной температурой воды на выходе насадки по формуле

$$T_{ж\text{ср}} = \frac{\sum_{j=1}^m \rho_{ж} c_{рж} T_{жi} q_i}{\rho_{ж} c_{рж} q_{ср}}, \quad (2.28)$$

где q_i - объемный расход воды в i -той зоне, $\text{м}^3/\text{с}$, $q_{ср}$ - средний расход воды во всей градирне, $\text{м}^3/\text{с}$.

Установлено, что при увеличении скорости воздуха (расхода в зонах) тепловая эффективность повышается, что дает снижение температуры охлаждаемой воды на выходе из блоков оросителей. При увеличении расхода воды и фиксированной скорости воздуха эффективность охлаждения воды снижается, что следует из законов тепломассообмена. Например, из уравнения теплового баланса имеем:

$$T_{жк} = T_{жн} - \frac{G}{LC_{рж}} (I_{к} - I_{н}), \quad (2.28.1)$$

Однако, даже при значительном снижении расхода воды нарушается смачиваемость поверхности блоков оросителей (коэффициент смачиваемости при $q_{ж} = 15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$ для трубчатой насадки ($a_v \approx 100 \text{ м}^2/\text{м}^3$) $\psi_v = 0,95$, а при $q_{ж} = 5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ час})$ $\psi_v = 0,5$, т.е. поверхность контакта фаз снижается почти в два раза. Этим объясняется значение максимума на кривой на рис. 2.8.

Полученные результаты по влиянию неравномерностей распределения фаз на эффективность процесса согласуются с известными данными работы насадочных колонн при масштабном переходе [121].

Численные исследования показали, что снижение эффективности охлаждения воды, вызванную неравномерностями распределения фаз, можно компенсировать за счет различного гидравлического сопротивления блоков оросителей. В области у стенок градирни, при боковом подводе атмосферного воздуха, необходимо повысить гидравлическое сопротивление блоков, постепенно с уменьшением к центру.

Неравномерность профиля скорости можно оценить по соотношению, предложенному Берманом

$$\frac{w(r)}{w_{\Gamma}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{ср}}}{\Delta P(r)}}, \quad (2.29)$$

где $\Delta P_{\text{ср}}$ - средний перепад давления блоков оросителей, Па; $\Delta P(r)$ - перепад давления в зависимости от $w(r)$.

Выполнены расчеты требуемой высоты H блоков оросителей с различными насадками при заданных температурном режиме и расходах воды и воздуха для промышленной градирни СК-400. Плотность орошения $8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; средняя скорость воздуха $w_{\Gamma}=2,0 \text{ м/с}$; начальная температура воды $T_{\text{жн}}=35^{\circ}\text{C}$; конечная температура воды $T_{\text{жк}}=24,5^{\circ}\text{C}$; температура мокрого термометра $T_{\text{мт}}=19^{\circ}\text{C}$; тепловая эффективность (2.27) $E_{\text{ж}}=0,531$.

Результаты расчетов высоты блоков различных оросителей с учетом неравномерности распределения воздуха в градирне СК-400 диаметром 20 м представлены на рисунке 2.9 [96].

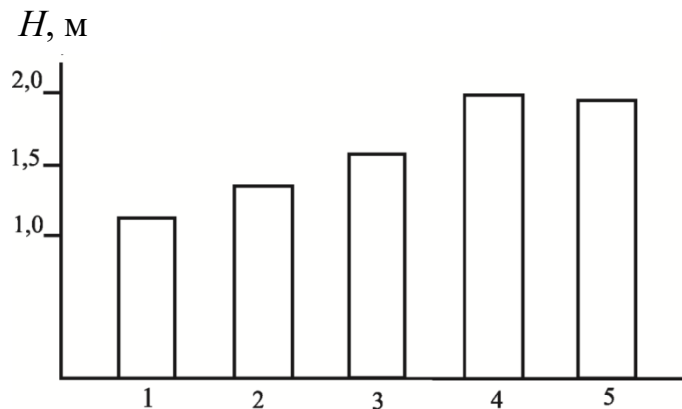


Рисунок 2.9. - Высота блоков оросителей при заданных режимных характеристиках охлаждения воды: 1- насадка ПР50; 2- Бальке-Дюрр; 3-ТПВВ; 4- гофрированные витые трубы (ТР44); 5- асбестовые блоки

Из полученных данных следует, что наиболее эффективными блоками являются ПР50 (решетчатые элементы из полиэтилена), насадки фирмы «Бальке-Дюрр» из волнистых полиэтиленовых решеток и пленочные оросители ТПВВ из ПВХ листов двойного гофрирования.

В таблице 2.1. представлены данные промышленной эксплуатации градирни СК-400 с полиэтиленовой сетчатой насадкой из цилиндров диаметром 50 мм и с

высотой блоков $H = 1,8$ м (столбцы 1-6) на АО «Казаньоргсинтез». Плотность орошения $8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; скорость воздуха $w_T = 2,0$ м/с. В столбцах 7 и 8 даны результаты расчетов тепловой эффективности $E_{ж}$ при равномерной подаче воздуха - 7 и с учетом неравномерного распределения профиля скорости (столбец 8) в нижнем сечении блоков из-за различного гидравлического сопротивления от стенок градирни к центру [96]. Из расчетов следует, что не учет неравномерности профиля скорости воздуха приводит к завышенному значению $E_{ж}$ на 25-35% относительных по сравнению с данными работы промышленной градирни. С учетом неравномерности расхождение $E_{ж}$ составляет не более 7-8% относительных. Таким образом, подтверждена адекватность математической модели и необходимость в учете неравномерности подачи воздуха.

Таблица 2.1. - Промышленные и расчетные данные тепловой эффективности градирни СК-400

Месяц	$T_{ж.н.},$ °C	$T_{ж.к.},$ °C	$T_{г.н.},$ °C	$T_{м.т.},$ °C	$\varphi, \%$	$E_{ж.},$ пром.	$E_{ж.},$ расчет с w_{cp}	$E_{ж.},$ расчет с $w(r)$
01	22	17	-20	-	70-75	0,23	0,36	0,25
04	26	19	5	2	78-79	0,29	0,43	0,31
07	33	29	28	18	60-70	0,21	0,32	0,24
09	28	22	15	7	80-85	0,29	0,42	0,3

Повысить эффективность крупномасштабных градирен возможно за счет организации повышенного гидравлического сопротивления блоков орошения у стенок градирни. Например, при использовании полиэтиленовых трубчатых насадок (сетчатых или гофрированных витых) у стенок следует применять трубки с меньшим диаметром, чем в центре: у стенок на расстоянии $r > 0,8R$ - трубки диаметром 25 мм, далее $0,6R < r < 0,8R$ - диаметром 32 мм и при $r < 0,6R$, т.е. к центру – 50 мм (R - радиус градирни, м). В результате происходит выравнивание профиля скорости воздуха и тепловая эффективность повышается.

Следует отметить, что в инженерных расчетах численное решение дифференциальных уравнений переноса используется довольно редко. Если применять традиционный метод расчета градирни, то влияние неравномерностей распределения воды и воздуха можно косвенно учесть за счет обратного перемешивания потоков, как показано в работах для массообменных насадочных аппаратов [63, 94, 105, 109, 131, 132]. Тогда требуемая высота блока оросителей, для заданного температурного режима охлаждения воды, удельной поверхности насадки и расхода воздуха может быть вычислена по выражению, приведенному в следующем разделе.

2.2. Модифицированный метод единиц переноса для насадок градирни

Метод единиц переноса используется в расчетах аппаратов с непрерывным контактом фаз, преимущественно насадочных абсорберов [116, 129, 131], а также других аппаратов [109, 133]. Причем он может применяться как при идеальном вытеснении потоков, так и с учетом перемешивания потоков.

В качестве примера рассмотрим применение данного метода для приближенных расчетов пленочных градирен с насадками при противотоке воды с воздухом с учетом гидродинамической структуры потоков.

На пленочный ороситель с регулярной насадкой поступает вода из форсунок на охлаждение с температурой $T_{ж,н}$, объемным расходом $V_{ж}$ ($\text{м}^3/\text{с}$), плотность орошения $q_{ж} = V_{ж}/S$ ($\text{м}^3/\text{м}^2 \text{ с}$), где S - площадь поперечного сечения блоков с насадкой, м^2 .

Тепловая нагрузка градирни (Вт)

$$Q = Lc_{pж}(T_{ж,н} - T_{ж,к}) = G(I_{г,к} - I_{г,н}), \quad (2.30)$$

где $I_{г,к}, I_{г,н}$ - конечная и начальная энтальпии воздуха, Дж/кг; $T_{ж,к}$ - конечная температура охлажденной воды, °С (обычно при проектировании задается); G - массовый расход воздуха, $G = w_{г}\rho_{г}S$, кг/с; $\rho_{г}$ - плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Выражение (2.30) записано без учета испарения и уноса воды, которые составляют не более 1-3% при применении брызгоуловителей.

Из уравнения баланса тепла (2.30) найдем энтальпию воздуха на выходе из насадки

$$I_{Г,к} = \frac{Q + GI_{Г,н}}{G}. \quad (2.31)$$

Тепловое число единиц переноса для расчета теплообменных аппаратов предложил применять академик В.В. Кафаров и др., что дает возможность использовать модели структуры потоков [131, 134], т.е. с учетом обратного перемешивания теплоносителей.

Число единиц переноса, записанное относительно движущей силы в виде разности энтальпий, следует из выражений [8]

$$Q = G(I_{Г,к} - I_{Г,н}), \quad (2.32)$$

$$Q = \beta_x F \Delta I_{ср}. \quad (2.33)$$

Отсюда при среднем значении коэффициента массоотдачи β_x , отнесенного к разности влагосодержаний число единиц переноса по газовой фазе

$$N_{Г} = \frac{\beta_x F}{G} \quad (2.34)$$

или также

$$N_{Г} = \frac{I_{Г,к} - I_{Г,н}}{\Delta I_{ср}}, \quad (2.35)$$

где в выражениях (2.34), (2.35) - F - площадь межфазной поверхности контакта воды и воздуха, m^2 ; $\Delta I_{ср}$ - средняя разность энтальпий (движущая сила процесса охлаждения воды), Дж/кг; β_x - имеет размерность, $кг/(m^2 \text{ сек})$.

При $\Delta I_{\delta}/\Delta I_{M} > 2$, среднее значение записывается как

$$\Delta I_{ср} = \frac{\Delta I_{\delta} - \Delta I_{M}}{\ln \frac{\Delta I_{\delta}}{\Delta I_{M}}}, \quad (2.36)$$

а при $\Delta I_{\delta}/\Delta I_{M} \leq 2$ – как среднее арифметическое

$$\Delta I_{\text{ср}} = (\Delta I_{\text{б}} + \Delta I_{\text{м}}) / 2, \quad (2.37)$$

где $\Delta I_{\text{б}} = \Delta I_{\text{гр.к}} - \Delta I_{\text{к}}$; $\Delta I_{\text{м}} = \Delta I_{\text{гр.н}} - \Delta I_{\text{н}}$.

Выражение (2.34) запишем, используя удельную поверхность насадки $a_v = F/(SH)$. Тогда получим

$$N_{\Gamma} = \frac{\beta_x a_v SH}{G} = \frac{\beta_x a_v H}{\rho_{\Gamma} w_{\Gamma}}. \quad (2.38)$$

Выражение (2.38) записано при условии, что вся поверхность насадки смочена жидкостью. При небольших плотностях орошения ($<20 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$) необходимо использовать коэффициент смачиваемости поверхности ψ_w , на которой умножается значение удельной поверхности a_v .

Из выражений (2.32), (2.33) и (2.34) находится высота насадки

$$H = \frac{G}{\beta_x a_v S} \left(\frac{I_{\text{ГК}} - I_{\text{ГН}}}{\Delta I_{\text{ср}}} \right). \quad (2.38.1)$$

Выражение (2.38.1) справедливо при условии идеального вытеснения потоков. Известно, что обратное перемешивание газа и жидкости снижает движущую силу процессов тепло- и массопередачи и эффективность процессов падает. Обратное перемешивание необходимо учитывать, если модифицированное число Пекле $Pe = w_{\text{ср}} H / D_{\text{п}} < 20$, где H - длина (высота) контактных устройств, м; $D_{\text{п}}$ - коэффициент обратного перемешивания, $\text{м}^2/\text{с}$; $w_{\text{ср}}$ - средняя скорость среды, м/с. Для учета обратного перемешивания применяются диффузионные модели структуры потоков, уравнение которых для двухфазных сред записываются с объемными источниками массы и теплоты. В работах [116, 129, 121] показано, что с достаточной для практических целей точностью можно использовать поправки к высоте единиц переноса в виде слагаемых $b_{\Gamma} D_{\text{пГ}} / w_{\Gamma}$ и $b_{\text{ж}} D_{\text{пЖ}} / u_{\text{ж}}$. Тогда из (2.35) и (2.38) запишем

$$H = \left[\frac{G}{\beta_x a_v S} + b_{\Gamma} \frac{D_{\text{пГ}}}{w_{\Gamma}} + b_{\text{ж}} \frac{D_{\text{пЖ}}}{u_{\text{ж}}} \right] \left(\frac{I_{\text{ГК}} - I_{\text{ГН}}}{\Delta I_{\text{ср}}} \right). \quad (2.39)$$

Отсюда можно записать тепловую эффективность по газовой фазе с модифицированным числом единиц переноса

$$E_{\Gamma} = \left\{ -H \left[\frac{G}{\beta_x a_v S} + b_{\Gamma} \frac{D_{\Pi\Gamma}}{w_{\Gamma}} + b_{\text{ж}} \frac{D_{\Pi\text{ж}}}{u_{\text{ж}}} \right]^{-1} \right\}. \quad (2.40)$$

В работе [69] идентифицирован коэффициент пропорциональности $b_{\Gamma} \approx b_{\text{ж}} \approx 2-4$ при $Pe_{\text{э}} > 1$. Тогда выражение (2.39) при $b_{\Gamma} \approx b_{\text{ж}} \approx 3$ получит вид

$$H \approx \left[\frac{G}{\beta_x a_v S} + 3 \left(\frac{d_{\text{э}}}{Pe_{\text{э}\Gamma}} + \frac{d_{\text{э}}}{Pe_{\text{э}\text{ж}}} \right) \right] \left(\frac{I_{\text{ГК}} - I_{\text{ГН}}}{\Delta I_{\text{ср}}} \right), \quad (2.41)$$

где $Pe_{\text{э}\Gamma} = w_{\Gamma} d_{\text{э}} / w_{\Gamma}$; $Pe_{\text{э}\text{ж}} = u_{\text{ж}} d_{\text{э}} / u_{\text{ж}}$ - модифицированные числа Пекле (Боденштейна), учитывающие обратное перемешивание потоков воздуха и воды, т.е. с эффективными коэффициентами диффузии; $d_{\text{э}}$ - эквивалентный диаметр насадки, м. где G - массовый расход воздуха, кг/с; $I_{\text{ГК}}$, $I_{\text{ГН}}$ - энтальпии воздуха на выходе и входе блоков насадки, Дж/кг; $\Delta I_{\text{ср}}$ - средняя разность энтальпий воздуха, Дж/кг.

Далее на основе экспериментальных исследований (глава 3) идентифицированы коэффициенты b_{Γ} и $b_{\text{ж}}$ для трубчатых и комбинированных насадок.

Значения чисел Пекле зависят от режимных и конструктивных характеристик блоков оросителей (насадок) и вычисляются по полуэмпирическим выражениям [116, 121, 129, 135, 136] или находятся экспериментально для каждого типа контактного устройства. При числах $Pe < 20$ обратное перемешивание воды и воздуха снижает движущую силу тепломассопередачи и для достижения заданного температурного режима требуется увеличение высоты блоков оросителей.

Например, в газовой фазе для хаотичных насадок ($Re_{\text{э}} > 40$) и регулярных с интенсификаторами ($Re_{\text{э}} > 1000$) с применением модели Тейлора получено [111]

$$Pe_{\text{э}\Gamma} = 0,52 \left(\xi / Re_{\text{э}} \right)^{0,25}, \quad (2.42)$$

где $Re_{\varepsilon} = w_{\Gamma} d_{\varepsilon\Gamma} / \nu_{\Gamma}$ - число Рейнольдса; ν_{Γ} - коэффициент кинематической вязкости газа, $\text{м}^2/\text{с}$; ξ - коэффициент гидравлического сопротивления контактного устройства.

Например, для регулярной гофрированной насадки IRG с шероховатой поверхностью установлено [117] ($5 < q_{\text{ж}} < 30 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$)

$$Pe_{\varepsilon\text{ж}} = 2,193 Re_{\varepsilon\text{ж}}^{0,336}. \quad (2.43)$$

Для многих насадок значения $Pe_{\varepsilon\Gamma}$ и $Pe_{\varepsilon\text{ж}}$ даны в работах [116, 121, 129, 135, 136].

Таким образом, при проектировании градирни предлагается следующий алгоритм [97]:

1) задается плотность орошения, скорость воздуха, начальные температуры воздуха и воды; относительная влажность и влагосодержание воздуха;

2) вычисляются энтальпии воздуха на входе и находится энтальпия воздуха на выходе (2.31);

3) рассчитывается средняя движущая сила испарительного охлаждения воды $\Delta I_{\text{ср}}$ (2.36);

4) экспериментальным или расчетным путем находятся модифицированные числа Пекле для газовой и жидкой фаз;

5) вычисляется число Шервуда (2.16) и коэффициент массоотдачи β_x ;

6) по формуле (2.41) вычисляется высота насадки, удовлетворяющая заданным термодинамическим и режимным параметрам охлаждения воды; вычисляется тепловая эффективность по газовой фазе E_{Γ} .

7) результаты расчетов показывают, что за счет обратного перемешивания высоту насадки следует увеличить на 7-15%, что согласуется с экспериментальными данными и теоретическими результатами [102, 105, 109, 119, 137].

Предложенный алгоритм расчета пленочных блоков охлаждения воды позволяет учесть перемешивание потоков теплоносителей.

2.3. Ячеечная модель гидродинамической структуры потока

2.3.1. Однопараметрическая модель

Далее рассматривается ячеечная модель структуры потоков в контактных устройствах градирен, записанная как при равномерной подаче воды и воздуха, а в следующем разделе - при неравномерных профилях скоростей.

При записи уравнений ячеечной модели рабочая зона градирни условно делится на ряд ячеек полного перемешивания. Число ячеек находится экспериментально и косвенно учитывает обратное перемешивание потоков, которое снижает движущую силу процессов и эффективность процесса [98].

Первоначально рассмотрена равномерная подача воды и воздуха (рисунок 2.10) с применением ячеечной модели для расчета тепловой эффективности. Допускается одинаковый размер ячеек по газовой и жидкой фазам.

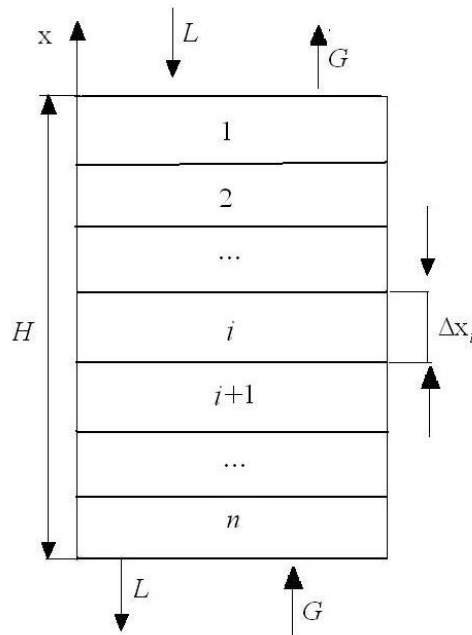


Рисунок 2.10. - Условное деление блока оросителей по высоте на ячейки

Выражение ячеечной модели для теплообмена в жидкой фазе

$$u_{ж} \rho_{ж} c_{pж} \frac{T_{i-1,ж} - T_{i,ж}}{\Delta x_i} = \frac{Q_i}{V_i}, \quad (2.44)$$

где $i=1,2,\dots,n$, $u_{\text{ж}}$ - средняя расходная скорость жидкости на все поперечное сечение блока оросителей, м/с; Δx_i - высота ячейки, м; Q_i - поток тепла в ячейке, Вт; T - температура, К; V_i - объем ячейки, м³; $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости, кг/м³; $c_{p\text{ж}}$ - удельная теплоемкость, Дж/(кгК); n - число ячеек.

Умножая левую и правую части выражения (2.42) на площадь поперечного сечения S блока оросителей получим

$$c_{p\text{ж}}L(T_{i-1,\text{ж}} - T_{i,\text{ж}}) = Q_i, \quad (2.45)$$

где $i=1,2,\dots,n$, L - массовый расход воды постоянный для всех ячеек.

Аналогично записываются уравнения теплопереноса в газовой фазе и массопереноса испарившейся воды

$$G(I_{i-1} - I_i) = Q_i, \quad (2.46)$$

$$G(C_{i-1} - C_i) = M_i, \quad (2.47)$$

где $i=1,2,\dots,n$, G - массовый расход воздуха, кг/с; I - энтальпия влажного воздуха, Дж/кг; M_i - поток массы испарившейся влаги, кг/с; C - влагосодержание воздуха, кг/кг.

Поток тепла в ячейке

$$Q_i = F_i \left[\alpha_{\Gamma} (T_{i,\text{ж}} - T_{i,\Gamma}) + I_{\text{ни}} \rho_{\Gamma} \beta_{\Gamma} (C_i^* - C_i) \right], \quad (2.48)$$

где $i=1,2,\dots,n$, F_i - площадь поверхности контакта воды и воздуха в i -той ячейке, м²; α_{Γ} - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); β_{Γ} - коэффициент массоотдачи, м/с; $I_{\text{ни}}$ - энтальпия водяного пара при температуре воды $T_{i,\text{ж}}$, Дж/кг; C_i^* - влагосодержание насыщенного воздуха, кг/кг. В выражении (2.47) $M_i = F_i \beta_{\Gamma} \rho_{\Gamma} (C_i^* - C_i)$, кг/с.

На основе применения аналогии Льюиса, как показано в работах [44, 108], выражение для потока тепла можно записать в форме

$$Q_i = \beta_{\text{х}} F_i (I_{\Gamma, i} - I_i), \quad (2.49)$$

где $I_{гр,i}$ - значение энтальпии на границе раздела фаз, Дж/кг; β_x - коэффициент массоотдачи, кг/(м²с).

Поверхность контакта фаз в i -той ячейке

$$F_i = S \Delta x_i a_v \Psi_w = S H a_v \Psi_w / n, \quad (2.50)$$

где H - высота блоков оросителей, м; a_v - удельная поверхность, м²/м³; Ψ_w - коэффициент смачиваемости поверхности насадки.

Коэффициенты тепло- и массоотдачи в хаотичных насадках (блоках оросителей) можно вычислить по выражениям, полученным в результате модификации гидродинамической аналогии ($40 < Re_3 < 8000$) (уравнения (2.15) – (2.18)).

Данные выражения связывают коэффициенты переноса с гидравлическим сопротивлением блока оросителей (коэффициентом ξ), что дает возможность делать расчеты по выделенным зонам с различным перепадом давления.

В результате из выражений (2.45) - (2.47) и (2.49) получаем следующую систему уравнений ячеечной модели

$$T_{i,ж} = T_{i-1,ж} - \beta_x F_i (I_{гр,i} - I_i) / c_{рж} L, \quad (2.51)$$

$$I_i = \frac{I_{i-1} + \beta_x F_i I_{гр,i} / G}{1 + \frac{\beta_x F_i}{G}}, \quad (2.52)$$

$$C_i = \frac{C_{i-1} + \beta_\Gamma \rho_\Gamma F_i C_i^* / G}{1 + \frac{\beta_\Gamma \rho_\Gamma F_i}{G}}, \quad (2.53)$$

при $i=1, 2, \dots, n$. $i=0$ – вход воды и выход воздуха; $i=n$ – выход воды и вход воздуха (рис. 2.9).

$$I_{гр,i} = c_{рsv} T_{i,ж} + (R_o + c_{рn} T_{i,ж}) C_i^*,$$

$C_i^* = f(T_{i,ж}, \text{ при } \varphi=100\%)$ – по справочным данным.

В результате решения данной системы уравнений получаем профили температуры воды $T_{i,ж}$, энтальпии воздуха I_i и влагосодержания C_i ($i=1,2,\dots,n$).

Число ячеек полного перемешивания связано с модифицированным числом Пекле по обратному перемешиванию $Pe=w_{\Gamma}H/D_{\Pi}$, где D_{Π} – коэффициент обратного перемешивания, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для регулярных насадок можно использовать выражение [111, 132]

$$Pe=0,43\frac{H}{d_{\text{э}}\sqrt{\xi}}, \quad (2.54)$$

при $Re_{\text{э}}>3600$ с гладкой поверхностью и $Re_{\text{э}}>1000$ – с интенсификаторами. и для хаотичных ($Re_{\text{э}}>40$) [111]

$$Pe=0,52H(Re_{\text{э}}/\xi)^{0,25}d_{\text{э}}^{-1}, \quad (2.55)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр насадки, м; $Re_{\text{э}}=w_{\Gamma}d_{\text{э}}/\nu_{\Gamma}$ – число Рейнольдса; ν_{Γ} – кинематической вязкости газа коэффициент, $\text{м}^2/\text{с}$; w_{Γ} – скорость воздуха, $\text{м}/\text{с}$.

При известном значении Pe число ячеек можно определить из приближенного соотношения ($Pe>3$) [129]

$$Pe=1,25(2n-1), \quad (2.56)$$

или при $Pe>10$, $n \approx Pe/2$.

Таким образом, представленная система уравнений ячеечной модели (2.51) - (2.53) является замкнутой.

Из решения системы уравнений (2.51) - (2.53) находятся профили температуры воды, энтальпии воздуха и влагосодержание воздуха, что дает возможность вычислить тепловую эффективность охлаждения воды в виде отношения

$$E_{\text{ж}} = \frac{T_{\text{жн}} - T_{\text{жк}}}{T_{\text{жн}} - T_{\text{мт}}}, \quad (2.57)$$

где $T_{\text{жн}}$, $T_{\text{жк}}$ – начальная и конечная температура воды, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{мт}}$ – температура воздуха по смоченному термометру, $^{\circ}\text{C}$ (теоретический предел охлаждения).

На рис. 2.11 представлен расчетный профиль температуры воды по ячейкам ($n=4$), полученный из решения системы уравнений (2.51) – (2.53) при охлаждении воды на макете градирни, исследованной в работе [102]. Начальная температура воды $T_{жн}=42,3^{\circ}\text{C}$, конечная из эксперимента $T_{жк}=31,3^{\circ}\text{C}$.

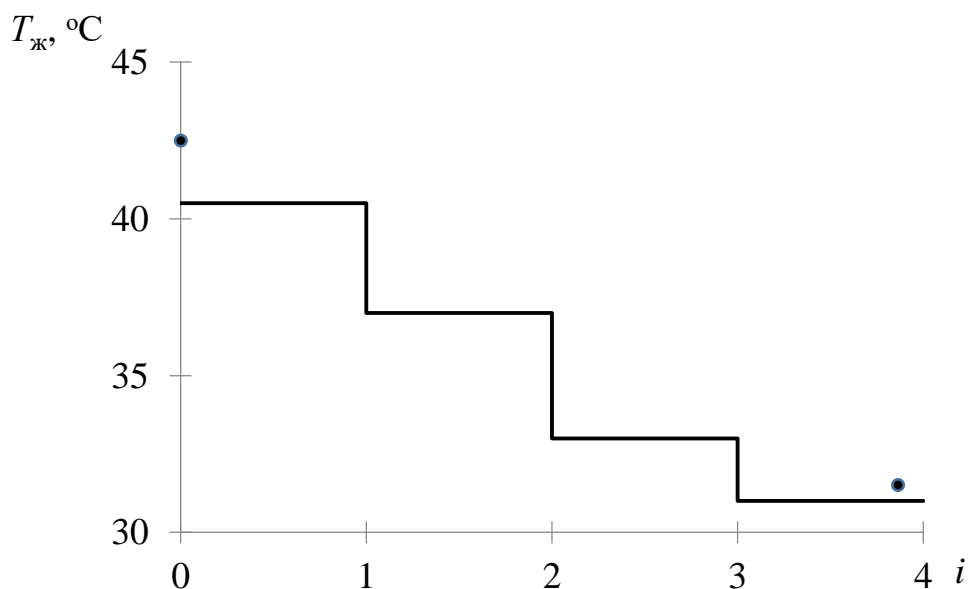


Рисунок 2.11 – Температурный профиль воды по ячейкам. $w_r=1,07$ м/с; $q_{ж}=4,93$ м³/(м²час); $H=0,4$ м; $a_v=140$ м²/м³. Сетчатая насадка в виде цилиндров диаметром 50 мм из полиэтилена ($n=4$); точки - экспериментальные данные [102].

Получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных результатов по температуре воды на выходе и по тепловой эффективности.

2.3.2. Двухпараметрическая ячеечная модель

В данном разделе представлена упрощенная математическая модель с учетом неравномерного профиля скорости воздуха [98].

В работах Кафарова В.В., Шестопалова В.В., Комиссарова Ю.А. и др. показано, что не всегда гидродинамическую структуру потоков в аппаратах можно описывать только одномерными моделями. В таких случаях рекомендовано использовать комбинированные модели [94, 131, 134]. Двумерную

модель блока оросителей в градирне с ячейками полного перемешивания в продольном и поперечном направлениях представим в виде на рисунке 2.12. Такая модель применима для регулярных насадок, когда поперечный перенос незначителен, т.е. перемешиванием в поперечном направлении можно пренебречь.

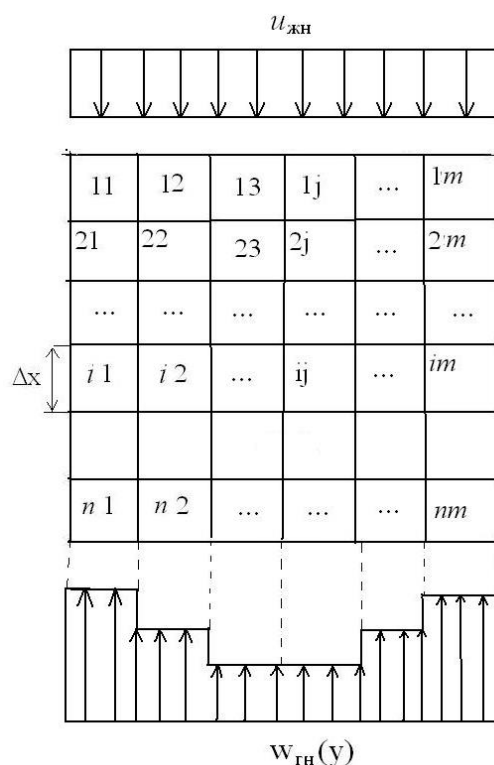


Рисунок 2.12. - Условное деление блока оросителей в регулярных насадках на ячейки при неравномерной подаче воздуха на входе

Допустим первоначальное равномерное распределение воды, это обеспечивается при числе точек орошения более 100 на м^2 и неравномерную подачу воздуха из-за боковой подачи в градирню. В таком случае скорость воздуха будет больше у стенок и меньше в центре.

Модель для расчета профиля скорости воздуха в нижнем поперечном сечении градирни дана в работах [102, 127]. Далее на основе представленной ячеечной модели показано влияние неравномерностей на тепловую эффективность градирни. Уравнения ячеечной модели (2.51) - (2.53) записываются для выделенных ячеек, как по высоте, так и в поперечном

направлении блока оросителей. Фактически регулярная насадка представляется в виде независимых параллельных зон, в каждой зоне - ячеечная модель по высоте, различное гидравлическое сопротивление, коэффициенты тепло- и массоотдачи и число ячеек, связанные со скоростью воздуха в зоне. В регулярной насадке перемешивание потоков в поперечном направлении незначительно и в модели не учитывается.

Представленная двумерная ячеечная модель состоит из системы алгебраических уравнений (2.51) – (2.53), которые решаются проще и быстрее, чем система дифференциальных уравнений.

2.3.3. Результаты и их обсуждение

В результате расчетов установлено, что при равномерном орошении насадки из-за неравномерности подачи воздуха снижение теплового КПД (2.52) может составлять на 5-35%, относительных.

Результаты расчетов эффективности (2.57) по зонам градирни при неравномерности подачи воды и профиля скорости воздуха w_m/w_{cp} , где w_m - скорость воздуха в m - зоне; w_{cp} - средняя скорость на все сечение градирни показали, что наименьшее значение эффективности при $w_m/w_{cp} < 1$, т.е. в зонах с пониженной скоростью воздуха. Расчеты показывают, что при равномерной подаче фаз ($q = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, $w_T = 1,5 \text{ м/с}$) значение $E_{ж} = 0,44$. При наличии неравномерностей осредненное КПД для все градирни составляет $E_{ж} = 0,342$, т.е. снижается почти на 30% относительных [98].

Полученные результаты по влиянию неравномерностей распределения фаз на эффективность процесса согласуются с данными работы насадочных колонн при масштабном переходе [108, 120, 138, 124]. Компенсировать снижение эффективности можно за счет повышения гидравлического сопротивления контактных устройств в зонах с повышенной скоростью воздуха.

2.3.4. Трение и тепломассообмен в восходящем газожидкостном потоке в канале с хаотичной насадкой

Известно, что большинство насадочных аппаратов, в том числе и градирни, работают при пленочном режиме, когда в противотоке газовый поток слабо влияет на гидродинамические закономерности течения пленки жидкой фазы. Однако при повышении скорости газа в насадке до некоторого значения (в зависимости от конструкции насадки и плотности орошения) начинается режим торможения и подвисяния жидкой фазы, а затем при дальнейшем повышении скорости газа обращенное восходящее движение пленки в направлении движения газа. Смену режима можно определить по значению перепада давления газа в колонне, а также визуально на макете аппарата.

При повышенных расходах фаз начинается режим эмульгирования по классификации академика В.В. Кафарова и др.

Режим эмульгирования характеризуется неустойчивым взаимодействием и большим перепадом давления (в несколько раз выше, чем при пленочном режиме). На рис. 2.13 показаны экспериментальные данные по перепаду давления орошаемой регулярной насадки из металлических гофрированных листов с шероховатой поверхностью и просечками в виде лепестков [117].

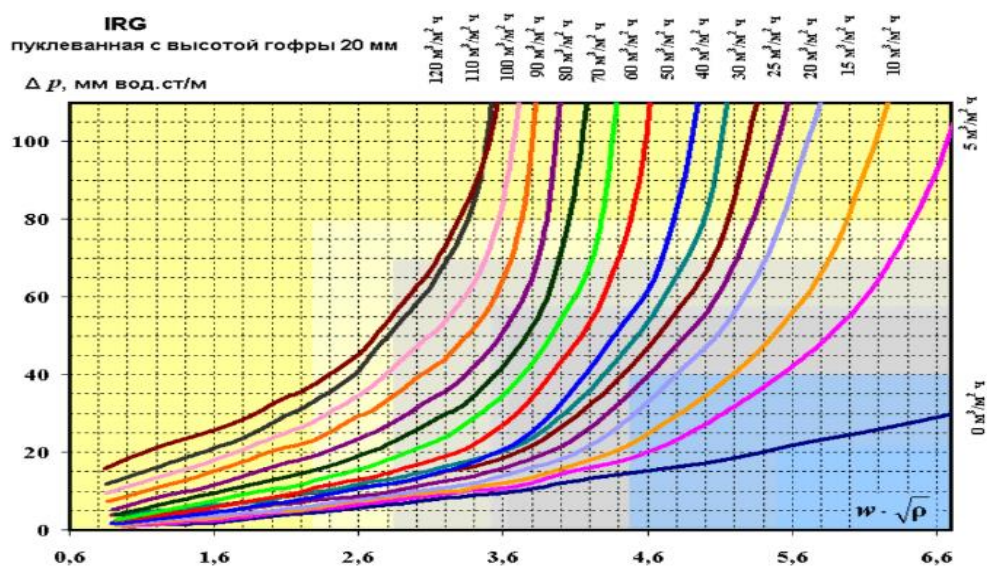


Рисунок 2.13. – Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки в зависимости от фактора скорости газа и плотности орошения.

Вид и фотография насадки показаны на рис. 2.14 и 2.15 [117].

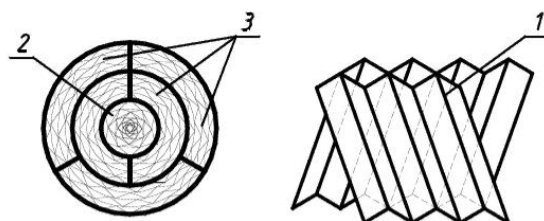


Рисунок 2.14. – Вид регулярной насадки: 1 – гофры смежных листов; 2 – центральный пакет; 3 – остальные пакеты.



Рисунок 2.15. – Насадка «Инжехим» для промышленной колонны

Данная насадка используется далее в мини градирне (глава 4).

Из рисунка 2.13 наглядно видно смену режима от пленочного к подвисянию и восходящему движению фаз. Как при повышении скорости воздуха, так и плотности орошения смена режима начинается раньше. Например, в интервале работы пленочной мини градирни при $q \leq 40 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$ режим подвисяния начинается при факторе скорости $w_r \sqrt{\rho_r} > 3,6$, т.е. при $w_r > 3,4$. При таких скоростях промышленные градирни практически не работают, однако представляет теоретический и практический интерес математическое моделирование восходящего движения фаз для приближенной оценки эффективности тепломасообмена при охлаждении воды воздухом.

Различными исследованиями экспериментально установлено отношение

$$\frac{\alpha_{\Gamma, \text{ж}}}{\alpha_{\Gamma}} \approx \sqrt{\frac{\tau_{\Gamma, \text{ж}}}{\tau_{\Gamma}}}, \quad (2.58)$$

$$\sqrt{\frac{\beta_{\Gamma, \text{ж}}}{\beta_{\Gamma}}} \approx \sqrt{\frac{\tau_{\Gamma, \text{ж}}}{\tau_{\Gamma}}},$$

где $\alpha_{\Gamma, \text{ж}}$, α_{Γ} – коэффициенты теплоотдачи в газовой фазе при сильном взаимодействии газа и жидкости при слабом взаимодействии; $\beta_{\Gamma, \text{ж}}$, β_{Γ} – аналогичные коэффициенты массоотдачи.

При использовании в расчетах тепломассообмена моделей пограничного слоя, а также гидродинамической аналогии переноса необходимо иметь среднее значение касательного напряжения трения $\tau_{\text{ст}}$ на рабочих поверхностях аппаратов или каких-либо технических устройств.

В ряде случаев значение $\tau_{\text{ст}}$ можно определить на основе известного перепада давления или коэффициента гидродинамического сопротивления. Однако при обтекании тел сложной геометрии или в аппаратах с подводом внешней энергии в рабочую зону вычислить $\tau_{\text{ст}}$ не представляется возможным. Тогда используется подход определения среднего значения $\tau_{\text{ст}}$ с применением механической мощности, вводимой в аппарат и далее с вычислением средней объемной скорости диссипируемой энергии [105, 111, 114, 139, 140].

На примере газлифтовой трубы, заполненной мелкой хаотичной насадкой, в работе рассмотрен подход для определения касательного напряжения на поверхности раздела фаз в восходящем газожидкостном потоке.

Газлифтовые трубы применяются при проведении газожидкостных реакций, для интенсификации процесса теплообмена и транспортирования дисперсной фазы.

В случае плоского течения гомогенной жидкости в ламинарном подслое записывают [140]

$$\varepsilon_0 = \nu_{\Gamma} \rho_{\Gamma} \left(\frac{du}{dy} \right)^2, \quad (2.59)$$

где ε_0 - скорость диссипации энергии; ν_Γ - коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ_Γ - плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; du/dy - градиент скорости, с^{-1} .

Так как $\tau_{\text{сГ}} = \nu_\Gamma \rho_\Gamma \left. \left(\frac{du}{dy} \right) \right|_{y=0}$, то имеем

$$\frac{\tau_{\text{сГ}}}{\rho_\Gamma \nu_\Gamma} = \left(\frac{\varepsilon_0}{\nu_\Gamma \rho_\Gamma} \right)^{1/2}. \quad (2.60)$$

Отсюда записывают среднее касательное напряжение и динамическую скорость $u_* = \sqrt{\tau_{\text{сГ}} / \rho_\Gamma}$ [140]

$$\tau_{\text{сГ}} = (\nu_\Gamma \rho_\Gamma \varepsilon_0)^{1/2}; \quad u_* = \left(\frac{\varepsilon_0 \nu_\Gamma}{\rho_\Gamma} \right)^{1/4}. \quad (2.61)$$

Данные выражения являются достаточно общими, так как позволяют вычислить $\tau_{\text{сГ}}$ и u_* и в случаях, когда отсутствует направленное течение жидкости вдоль стенки, а турбулентность вносится внешним источником. В работах Calderbank РН., Moo – Young М., на основе теории турбулентности Колмогорова, установлена справедливость зависимостей (2.61) в случае изотропной турбулентности, когда вводимая мощность N рассеивается равномерно во всем объеме среды, т.е. $\varepsilon = N/V$, где V – объем, м^3 . Это справедливо с точностью до коэффициента пропорциональности χ и в случаях, близких к изотропной турбулентности. Предполагая, что в хаотичной насадке при восходящем движении газожидкостной среды создается турбулентность, близкая к изотропной, то долю диссипации энергии ε_0 в пристенном слое, вызванную пульсациями в жидкости от воздействия газа и хаотичной насадкой, можно представить в виде

$$\varepsilon_0 = \chi^4 \varepsilon, \quad (2.62)$$

где коэффициент χ устанавливается экспериментально. Для большинства аппаратов он получен в интервале $\chi = 1,7-2,4$ [140]. В среднем можно принять $\chi \approx 2,0$, а для насадок получено $\chi \approx 1,85$ [111].

Средняя объемная скорость диссипации энергии записывается с применением перепада давления

$$\varepsilon = \frac{\Delta P_{\Gamma} S_{\kappa} w_{\Gamma}}{S_{\kappa} H}, \quad (2.63)$$

где S_{κ} – площадь поперечного сечения аппарата, м^2 .

На основе рассмотренного подхода касательное напряжение в хаотичной насадке при турбулентном движении получено в форме [86]

$$\tau_{\text{сГ}} = 1,85^2 \rho_{\Gamma} \left(\frac{\xi w_{\Gamma}^3 v_{\Gamma}}{2d_{\text{э}}} \right)^{1/2}, \quad (2.64)$$

где ξ – коэффициент сопротивления насадки; w_{Γ} – скорость газа в насадке, м/с ; $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр насадочного слоя, м .

Отсюда среднее касательное напряжение и динамическую скорость можно представить в более удобной форме [141]

$$\tau_{\text{сГ}} = 2,43 \rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2 \left(\frac{\xi}{Re_{\text{э}}} \right)^{1/2}, \quad (2.65)$$

$$u_{*} = 1,56 w_{\Gamma} \left(\frac{\xi}{Re_{\text{э}}} \right)^{1/4}, \quad (2.66)$$

где $Re_{\text{э}} = \frac{w_{\Gamma} d_{\text{э}}}{\nu}$ – число Рейнольдса для насадочного слоя.

Тогда для восходящего потока в канале можно использовать формулу [140]

$$u_{*} = \left[\left(\tau_{\text{сГ}} / \rho_{\Gamma}^2 \right) + \chi^4 v_{\text{ж}} \rho u_{\text{от}} \varphi (1 - \varphi)^2 \right]^{1/4}, \quad (2.67)$$

где φ – среднее объемное газосодержание; $u_{\text{от}}$ – относительная скорость фаз, м/с .

В выражении (2.67) $\tau_{\text{сГ}}$ вычисляется по формуле (2.65), а правое слагаемое учитывает наличие жидкой фазы.

Применение уравнения (2.67) дает положительные результаты при вычислении коэффициентов тепло- и массоотдачи в газожидкостных средах с использованием моделей турбулентного пограничного слоя. Так, например, при применении мелкой хаотичной насадки с свободным объемом 95% и удельной

поверхностью $580 \text{ м}^2/\text{м}^3$ в несколько раз повышается эффективность переноса по сравнению с газлифтовой трубой без насадки.

Расчеты показывают, что при $w_r=5,0 \text{ м/с}$ $q_{ж}=40 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$ коэффициенты тепло- и массоотдачи повышаются в три раза по сравнению с движением в канале насадки только газовой фазы. Однако при $w_r=5,0 \text{ м/с}$ перепад давления возрастает многократно и такой режим, несмотря на значительные повышения коэффициентов тепло- и массоотдачи, нецелесообразен.

Выводы

В данной главе показан один из вариантов решения проблемы масштабного перехода для градирни, где учет неравномерности потоков газа и жидкости выполняется за счет различного гидравлического сопротивления пленочных блоков с регулярными насадками при заданных распределениях воды и воздуха. Показано, что наибольшее влияние на тепловую эффективность охлаждения воды оказывает неравномерная подача воздуха (снижение эффективности на 25-35%) и в меньшей степени – распределение воды. Выполнена проверка адекватности математической модели по данным исследования макета градирни, а также работы промышленной градирни диаметром 20 метров. Неравномерность распределения фаз частично компенсирована за счет различного гидравлического сопротивления блоков оросителей по перечному сечению градирни, что приводит к повышению тепловой эффективности.

Выполнена модификация метода единиц переноса для пленочной градирни, что дает возможность учесть обратное перемешивание теплоносителей в пленочном блоке оросителей при расчете высоты насадки и тепловой эффективности в газовой фазе. Представленная математическая модель может быть обобщена на широкий класс тепло- и массообменных аппаратов при диагностике эффективности процессов и проектировании новых контактных устройств в системе газ-жидкость.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОЧНОЙ ГРАДИРНИ С НАСАДКАМИ

Интенсификация процесса охлаждения воды на промышленных предприятиях [131] и тепловых станциях [47] является важным направлением развития теоретических и прикладных исследований в теплотехнике и промышленной теплоэнергетике.

Целью данной главы является получение экспериментальных данных и обобщение результатов по гидравлическим и тепломассообменным характеристикам регулярного и комбинированного насадочного слоя при проведении процесса охлаждения воды воздухом на макете пленочной градирни.

3.1. Схема и описание экспериментальной установки

Регулярные насадки чаще применяются в ректификационных и абсорбционных колоннах, где необходим небольшой перепад давления, например при ректификации [129, 134], хемосорбции [116], абсорбции [116, 129]. Кроме этого, регулярные насадки находят широкое применение в пленочных градирнях и скрубберах–охладителях при очистке дымовых и технологических газов. К настоящему времени известны сотни конструкций различных регулярных [93, 100, 101], нерегулярных (хаотичных) насадок и различных комбинированных [117]. Регулярные насадки отличаются от хаотичных меньшим гидравлическим сопротивлением, стоимостью и более высокими удельными гидравлическими нагрузками. Скорость газа при подвешивании жидкой фазы примерно в два раза выше, чем у хаотичных при аналогичных условиях работы. Причем в регулярных насадках меньше обратное перемешивание потоков, однако, эффективность немного уступает хаотичным из-за меньшей турбулизации газового потока. Если в хаотичных насадках турбулентный режим газа начинается при числе Рейнольдса $Re_{\text{э}} > 40$, то в регулярных с гладкой поверхностью примерно как в

трубах при $Re_{\text{э}} > 2300$. Однако при наличии поверхностных интенсификаторов (выступы, накатки, лепестки и т.д.) турбулизация начинается при $Re_{\text{э}} > 300 - 500$, где $Re_{\text{э}} = w_{\text{Г}} d_{\text{э}} / \nu_{\text{Г}}$; $w_{\text{Г}}$ – средняя скорость воздуха в слое, м/с; $w_{\text{Г}} = w_0 / \varepsilon_{\text{СВ}}$; w_0 – скорость воздуха на полное сечение аппарата, т.е. без насадки, м/с; $d_{\text{э}} = 4\varepsilon_{\text{СВ}} / a_{\text{У}}$ – эквивалентный диаметр насадки, м; $\varepsilon_{\text{СВ}}$ – удельный свободный объем; $a_{\text{У}}$ – площадь удельной поверхности, м²/м³.

Эксперименты проводились на установке «Мини градирня с насадками», разработанной при участии автора и установленной в лаборатории КГЭУ. На рисунке 3.1 и 3.2 представлены схема и фотография экспериментальной установки с колонной для исследования процесса охлаждения воды воздухом. Нагрев воды происходит в емкости E электронагревателем ЭЛ . На схеме K – колонна макета градирни с внутренним диаметром 190 мм из оргстекла, высота колонны два метра; $N1$, $N2$ – насосы; B – газодувка; E – 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 м². Высота регулярной насадки $H_1 = 1,0$ м; нерегулярной $H_2 = 0,2$ м. Общая высота комбинированной насадки $H = 1,2$ м. Расстояние от распылителя воды до слоя комбинированной насадки 180 мм. Допущения: основной теплообмен происходит в насадочных слоях; теплопередача через стенки градирни в окружающей воздух незначительная; основное сопротивление теплообмена сосредоточено в газовой фазе [137].

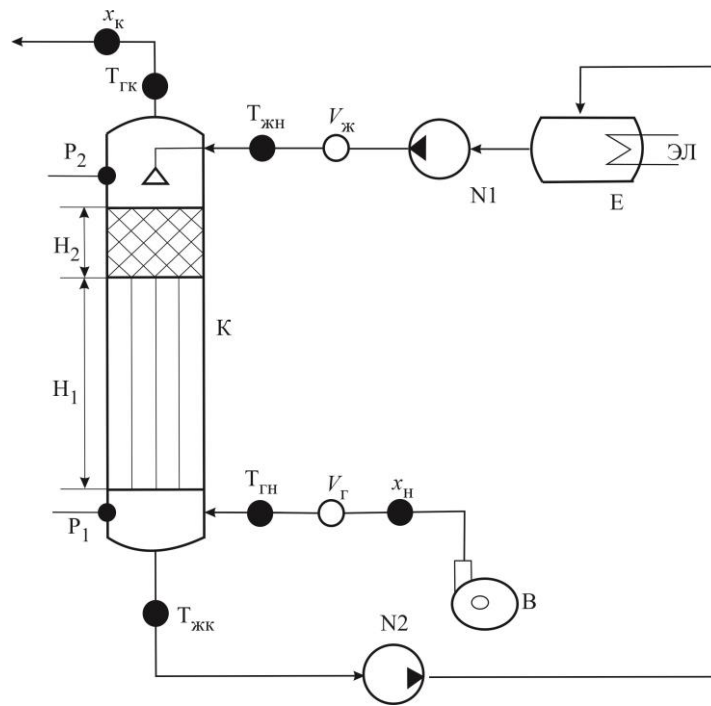


Рисунок 3.1. – Принципиальная схема экспериментальной установки: К – колонна; В – вентилятор (газодувка); N – насосы; E – емкость; H_1 , H_2 – высота слоев насадки; ЭЛ – электронагреватель воды. Остальные обозначения в тексте.



Рисунок 3.2. – Фото установки «Мини градирня с насадками»

Вспомогательное оборудование: теплосчетчик Карат компакт, термоанемометр СЕМДТ–618, диффманометр ПРОМА–ИДМ, насос вихревой REDVERGRD–VP40, радиальный вентилятор СовПлимFS–р3400/SP, testo 835–T2 – Высокотемпературный ИК–термометр с 4–х точечным лазерным целеуказателем (оптика 50:1).

Основные технические характеристики приборов приведены в Приложении 2.

Установка представляет собой цилиндрический аппарат, заполненный насадками. Сверху подается охлаждаемая вода, снизу в противотоке поступает охлаждающий газ (воздух). Температура воды поддерживается в пределах 35–38°C, температура газа зависит от температуры окружающей среды (помещения, в котором проводится эксперимент), и составляет 25–30°C. Для стабилизации расхода жидкости установлен бак – усреднитель, в качестве которого выступает термостат, также поддерживающий расход и температуру воды на входе в установку. При эксплуатации установки без бака – усреднителя, то есть подачи жидкости напрямую из линии городского водоснабжения, наблюдается значительный перепад температуры и расхода воды, что делает результаты эксперимента несостоятельными.

В качестве распылителя применяется душевая лейка с числом отверстий 130 штук. В роли регулярной насадки использованы полимерные цилиндрические трубы (гладкие и гофрированные (шероховатые) с выступом 4,5 мм) диаметром 50 мм. Диаметр труб выбран исходя из наиболее широко применяемых в промышленных градирнях. В колонне без деформации разместилось 10 труб, удельная поверхность регулярной насадки составила $a_v = 110 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Шероховатые трубы условно считались как гладкие.

На рисунке 3.3. показано расположение регулярной трубчатой насадки и размеры выступов на ее поверхности (кольцевая шероховатость).

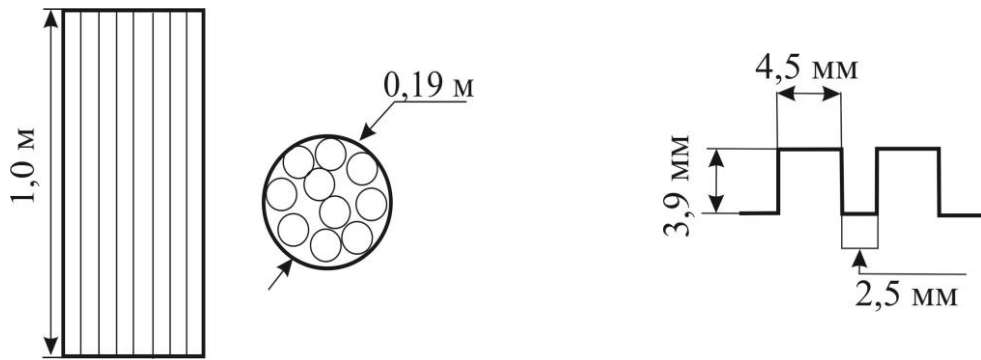


Рисунок 3.3. – Схема трубчатой регулярной насадки с дискретной шероховатостью в виде прямоугольных выступов по периметру

Так как изготовить трубы с дискретной кольцевой регулярной шероховатостью (выступами с наружной стороны и впадинами на внутренней) не представлялось возможным, были приобретены 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.

На рис. 3.4 показаны фото элементов насадок из полимерных труб

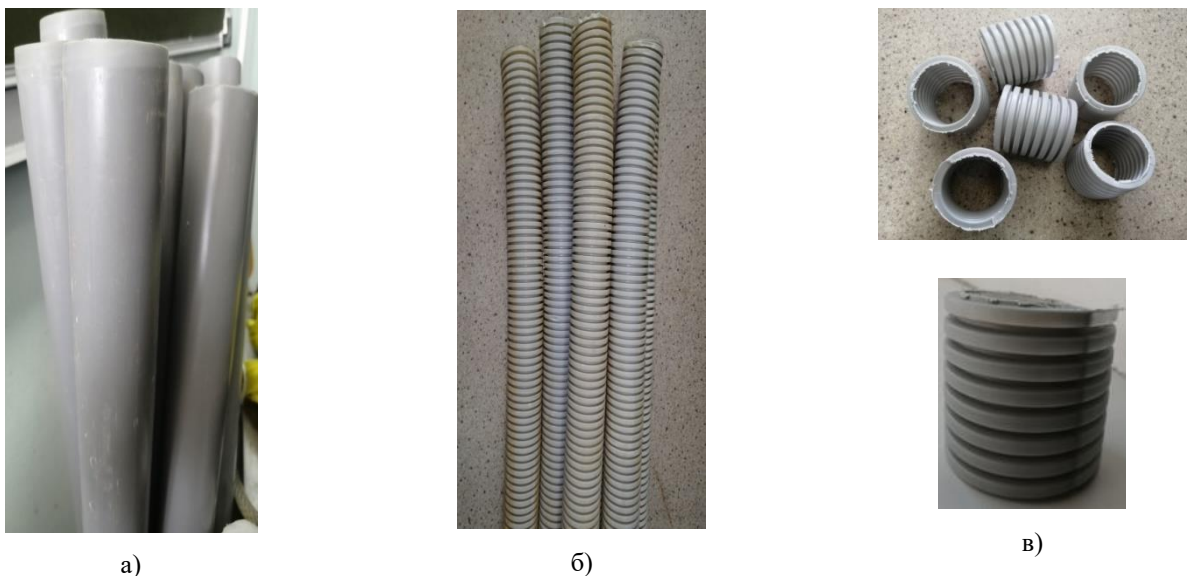


Рисунок 3.4. – Фото элементов насадок из полимерных труб

а) – гладкие трубы; б) – трубы с кольцевой дискретной шероховатостью; в) – хаотичная кольцевая насадка

В роли нерегулярной – те же цилиндры с кольцевой дискретной шероховатостью, нарезанные из труб 50x50 мм, а также металлическая насадка «Инжехим–2012» 16 мм (рисунок 3.5.) [117, 141].

Внизу колонны установлена опорная распределительная решетка, на которую помещен слой регулярных насадок. Основой для укладки хаотичной насадки является насадка регулярная.



Рисунок 3.5. – Фото элементов металлических насадок «Инжехим»

Основные технические характеристики насадки «Инжехим–2012» приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. – Основные технические характеристики насадки «Инжехим–2012» [117, 141]

Размер элемента, мм	Толщина материала, мм	Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{м}^3$	Свободный объем $\text{м}^3/\text{м}^3$	Эквивалентный диаметр, м	Материал насадки
16	0,5	267	0,95	0,0142	листовая сталь

Нерегулярная насадка, засыпанная поверх основного слоя, выполняет несколько функций.

Во–первых, более равномерное орошение регулярной насадки за счет перераспределения жидкой фазы хаотичными элементами [121]. 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, мелкие капли при повышении скорости начинают захватываться газовым потоком и уносятся в шлемовую линию аппарата (а в градирне – в атмосферу).

В качестве регулярной насадки применялись гладкие и с регулярной кольцевой дискретной шероховатостью полиэтиленовые трубки диаметром 50 мм (10 штук), а нерегулярной (хаотичной) аналогичные трубки нарезанные в цилиндры высотой 50 мм (35 шт.) (т.е. аналог колец Рашига 50x50мм), 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 $T_{\text{гн}} = 25\text{-}30^\circ\text{C}$, а воды $T_{\text{жн}} = 35\text{-}38^\circ\text{C}$. Плотность орошения $q_{\text{ж}}$ 8,8–19,4 $\text{м}^3/\text{м}^2\text{час}$; 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.

3.2. Экспериментальные данные гидравлических и теплообменных характеристик

Эксперименты выполнялись в три этапа [137, 142]. 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 (50x50мм) 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 $C_{\text{к}}$, кг/кг ; перепад давления воздуха

насадочного слоя $\Delta P_r = P_1 - P_2$ Па. Погрешность экспериментальных исследований не более $\pm 7-8\%$. Эксперименты для каждого режима выполнялись трижды, затем брались средние значения.

3.2.1. Колонна с насадками из гладких труб

Первоначально для сравнения были выполнены исследования теплообмена с насадкой из гладких труб диаметром 50 мм с высотой слоя 1,0 м.

В качестве примера приведены экспериментальные данные, полученные в ходе исследования охлаждения воды в колонне с насадками из гладких труб (плотность орошения 8,8 и 12,4 м³/(м²час)) приведены в таблице 3.2 (без верхнего хаотичного слоя), более подробно – в Приложении 1.

Таблица 3.2. – Экспериментальные данные охлаждения воды в колонне с насадками из гладких труб (плотность орошения 8,8 и 12,4 м³/(м²час))

Скорость воздуха в колонне, м/с	эксперимент № 1				эксперимент № 2				
	w_r , м/с	1,54	1,94	2,26	2,50	1,54	1,94	2,26	2,50
Плотность орошения, м ³ /(м ² час)	$q_{ж}$	8,8	8,8	8,8	8,8	12,4	12,4	12,4	12,4
Температура, °С воздуха на входе	$T_{гн}$	25,8	27,4	28,7	30	25,5	26,8	28,4	29,7
воздуха на выходе	$T_{гк}$	27,6	27	26,7	26,6	28,2	27,8	27,4	26,9
воды на входе	$T_{жн}$	35,19	35,13	35,07	34,98	35,06	34,8	34,4	33,8
воды на выходе	$T_{жк}$	29,66	28,76	28,23	27,97	30,59	29,86	29,2	28,64

Мокрого термометра на входе	T_{MT}	16,1	16,6	17,3	17,4	16,2	16,6	17,1	17,2
Относительная влажность, %	φ_H , %	38,7	36,4	35	33,3	39,7	37,8	35,6	33,7
Относительная влажность, %	φ_K , %	90,8	90,9	90,9	90,9	90,7	90,8	90,8	90,8
Перепад давления	$\Delta P_{Г}$, Па	2,2	3,1	5,0	6,3	4,1	5,0	6,6	8,4

3.2.2. Колонна с насадками из шероховатых труб

Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования охлаждения воды в колонне с насадками из шероховатых труб (плотность орошения 8,8 и 12,4 м³/(м²час)) приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. – Экспериментальные данные охлаждения воды в колонне с насадками из шероховатых труб (плотность орошения 8,8 и 12,4 м³/(м²час))

Скорость воздуха в колонне, м/с	$w_{Г}$, м/с	эксперимент № 1				эксперимент № 2			
		1,54	1,94	2,26	2,50	1,54	1,94	2,26	2,50
Плотность орошения, м ³ /(м ² час)	$q_{ж}$	8,8	8,8	8,8	8,8	12,4	12,4	12,4	12,4
Температура, °С воздуха на входе	$T_{ГН}$	25,6	26,7	28,3	29	26,7	27,8	28,8	29,2
воздуха на выходе	$T_{ГК}$	27,4	26,9	26,4	26,1	27,6	26,7	26,3	26,5
воды на входе	$T_{жН}$	35,01	34,94	34,56	34,6	34,48	34,45	32,81	33,06

воды на выходе	$T_{\text{жк}}$	29,38	28,48	27,79	27,33	29,72	28,38	27,74	27,69
Мокрого термометра на входе	$T_{\text{мт}}$	16,1	16,6	17,3	17,4	16,2	16,6	17,1	17,2
Относительная влажность, %	$\varphi_{\text{н}}$, %	36,7	35,4	32,9	31	33,1	31,1	30	29,4
Относительная влажность, %	$\varphi_{\text{к}}$, %	90,4	90,5	90,6	90,6	90,3	90,5	90,5	90,5
Перепад давления	$\Delta P_{\text{г}}$, Па	4,5	4,8	8,9	11,9	7,0	10,0	12,1	14,4

3.2.3. Колонна с комбинированными насадками из шероховатых труб

Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования охлаждения воды в колонне с комбинированными насадками из шероховатых труб (плотность орошения 8,8 и 12,4 м³/(м²час)) приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. – Экспериментальные данные охлаждения воды в колонне с комбинированными насадками из шероховатых труб (плотность орошения 8,8 и 12,4 м³/(м²час))

Скорость воздуха в колонне, м/с	$w_{\text{г}}$, м/с	эксперимент № 1				эксперимент №2			
		1,54	1,94	2,26	2,50	1,54	1,94	2,26	2,50
Плотность орошения, м ³ /(м ² час)	$q_{\text{ж}}$	8,8	8,8	8,8	8,8	12,4	12,4	12,4	12,4
Температура, °С воздуха на входе	$T_{\text{гн}}$	27,7	27,6	27,2	27,3	28,9	28,8	28,9	28,8

воздуха на выходе	$T_{ГК}$	25,8	28,3	29,8	31,3	27,1	29,2	31,2	32,6
воды на входе	$T_{ЖН}$	35,31	35,23	34,94	34,1	35,49	35,46	35,24	34,73
воды на выходе	$T_{ЖК}$	29,03	28,62	27,83	27,51	30,96	30,34	30,15	29,45
Мокрого термометра на входе	$T_{МТ}$	16,2	17,6	18,1	18,8	17,7	19,0	20,2	20,9
Относительная влажность, %	$\varphi_{Н, \%}$	36,5	34,3	31,7	29,9	39,4	38,1	36,5	34,9
Относительная влажность, %	$\varphi_{К, \%}$	90,2	89,8	89,9	90	89,4	89,3	89,2	89,3
Перепад давления	$\Delta P_{Г, Па}$	23,1	33,9	45,2	58,6	22,9	36,6	48,4	61,9

3.2.4. Колонна с насадками из комбинированных шероховатых труб и «Инжехим–2012» (с верхним слоем)

Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования охлаждения воды в колонне с комбинированными насадками из шероховатых труб и «Инжехим–2012» (плотность орошения 8,8 и 12,4 м³/(м²час)) приведены в таблице 3.5.

Таблица. 3.5. – Экспериментальные данные охлаждения воды в колонне с комбинированными насадками из шероховатых труб и «Инжехим–2012» (плотность орошения 8,8 и 12,4 м³/(м²час))

Скорость воздуха в колонне, м/с	$w_{г}$, м/с	эксперимент № 1				эксперимент № 2			
		1,54	1,94	2,26	2,50	1,54	1,94	2,26	2,50
Плотность орошения, м ³ /(м ² час)	$q_{ж}$	8,8	8,8	8,8	8,8	12,4	12,4	12,4	12,4
Температура, °С воздуха на входе	$T_{гн}$	27,1	27,9	30,1	31,6	28,4	30	31,7	32,1
воздуха на выходе	$T_{гк}$	28,7	27,9	27,2	27,1	29,6	28,9	28,2	27,4
воды на входе	$T_{жн}$	35,18	34,84	34,18	33,8	35,62	34,64	33,65	32,87
воды на выходе	$T_{жк}$	28,57	27,64	26,7	26,54	30,67	29,31	28,28	27,07
Мокрого термометра на входе	$T_{мт}$	15,6	16,0	17,3	18,1	16,7	17,3	18,1	18,0
Относительная влажность, %	$\varphi_{н}$, %	28,9	28,2	27	25,9	29,4	27,4	25,9	24,4
Относительная влажность, %	$\varphi_{к}$, %	91,2	91	90,6	90,3	89,7	89,6	89,8	94,6
Перепад давления	$\Delta P_{г}$, Па	49,5	76,3	103,1	126,1	51,9	82,1	111,1	134,4

3.3. Обработка результатов экспериментальных исследований

На основе измеренных из эксперимента гидравлических и термодинамических параметров охлаждения воды обработка результатов выполнена в следующем порядке [137].

Вычислялась удельная энтальпия воздуха на входе $I_H = (c_{рв} + c_{рп}C_H)T_{гн} + r_0C_H$, на выходе $I_K = (c_{рв} + c_{рп}C_K)T_{гк} + r_0C_K$, Дж/кг, где $c_{рв}$, $c_{рп}$ – удельные теплоемкости сухого воздуха и водяного пара, Дж/(кг К); r_0 – скрытая теплота парообразования воды, Дж/кг. Значения равны $c_{рв} = 1005$ Дж/(кгК); $c_{рп} = 1850$ Дж/(кгК); $r_0 = 250 \cdot 10^4$, Дж/кг. Влажосодержание воздуха C_H , (кг/кг) находилось по известным справочным данным по значениям измеренной относительной влажности φ_H и начальной температуре воздуха на входе $T_{гн}$, °С. Аналогично находились значения на выходе.

Также вычислялись значения удельных энтальпий на линии насыщения $I_H^* = (c_{рв} + c_{рп}C_H^*)T_{жн} + r_0C_H^*$, $I_K^* = (c_{рв} + c_{рп}x_K^*)T_{жк} + r_0x_K^*$, Дж/кг, где C_H^* , C_K^* – влажосодержание (кг/кг) при $T_{жн}$, $T_{жк}$ и относительной влажности $\varphi = 100\%$. Эти значения имеются в справочных данных и для удобства сведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6. – Термодинамические параметры влажного воздуха

T , °С	C^* , кг/кг	I^* , кДж/кг	T , °С	C^* , кг/кг	I^* , кДж/кг
20	0,0147	57,3	34	0,0345	122,46
21	0,01566	60,77	35	0,03659	128,89
22	0,01667	64,37	36	0,03874	135,48
23	0,01775	68,15	37	0,04111	142,65
24	0,01888	72,06	38	0,04357	150,05
25	0,0201	76,20	39	0,04616	157,80
26	0,02136	80,45	40	0,04890	165,94
27	0,0227	84,91	41	0,05178	174,46
28	0,02412	89,58	42	0,05484	186,86
29	0,02562	94,45	43	0,05806	192,86
30	0,02721	99,57	44	0,06146	202,76
31	0,02889	104,92	45	0,06506	213,18
32	0,03066	110,50	46	0,0689	222,1
33	0,03253	116,35			

Коэффициент массоотдачи определялся с применением следующих выражений [8, 102]:

На основе выражений (1.2), (1.3) с применением аналогии Льюиса записывается поток теплоты в градирне в известной форме

$$Q = G(I_K - I_H) = \beta_x F \Delta I_{\text{ср}}, \quad (3.1)$$

где $\Delta I_{\text{ср}}$ – средняя движущая сила процесса тепломассопередачи, Дж/кг; β_x – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, кг/(м²с); F – площадь поверхности контакта фаз, м².

Эффективность охлаждения воды $E_{\text{ж}}$ и нагрева воздуха $E_{\text{г}}$, исходя из достигнутых величин к максимально возможным, записывается в форме

$$E_{\text{ж}} = \frac{T_{\text{жн}} - T_{\text{жк}}}{T_{\text{жн}} - T_{\text{мт}}}, \quad E_{\text{г}} = \frac{I_{\text{к}} - I_{\text{н}}}{I_{\text{к}}^* - I_{\text{н}}}, \quad (3.2)$$

где $T_{\text{мт}}$ – температура смоченного термометра окружающего воздуха, °С.

Перепад давления воздуха комбинированного насадочного слоя составит из суммы перепадов давлений нижнего (регулярного) ΔP_1 и верхнего (хаотичного) ΔP_2 слоев и имеет форму

$$\Delta P_1 = \xi_1 \frac{H_1 \rho_{\Gamma} w_0^2}{d_{\text{э1}} 2\varepsilon_{\text{св1}}^2}; \quad \Delta P_2 = \xi_2 \frac{H_2 \rho_{\Gamma} w_0^2}{d_{\text{э2}} 2\varepsilon_{\text{св2}}^2}, \quad (3.3)$$

где ξ_1, ξ_2 – коэффициенты гидравлического сопротивления нижнего и верхнего слоя; нижние индексы «1» – нижний слой; «2» – верхний слой.

При измерении перепада давления исключались местные сопротивления при входе и выходе воздуха в колонне.

Экспериментальные исследования регулярной насадки из труб с дискретно–регулярной шероховатостью без орошения и без верхнего хаотичного слоя дают зависимость $\xi_{1\text{сyx}} \approx 2,2/Re_{\text{э}}^{0,3}$ при $1500 < Re_{\text{э}} < 5500$. Верхнего хаотичного слоя из колец 50x50 мм с шероховатостью $\xi_{2\text{сyx}} \approx 2,2$ и слабо зависит от числа Рейнольдса. Коэффициент сопротивления верхнего слоя из хаотичной насадки «Инжехим–

2012» также слабо зависит от числа Рейнольдса. Получено выражение $\xi_{\text{сух}} \approx 6,5/Re_3^{0,135}$.

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

Очевидно, что перепад давления газа орошаемого насадочного слоя больше, чем у сухого. Результаты исследований представлены в следующих разделах.

3.4. Результаты экспериментов колонны с насадкой из гладких труб

Перепад давления воздуха определялся экспериментально.

Зависимость перепада давления газа для сухих насадок в виде гладких труб ($H=1,0$ м) от скорости воздуха приведена на рис. 3.6.

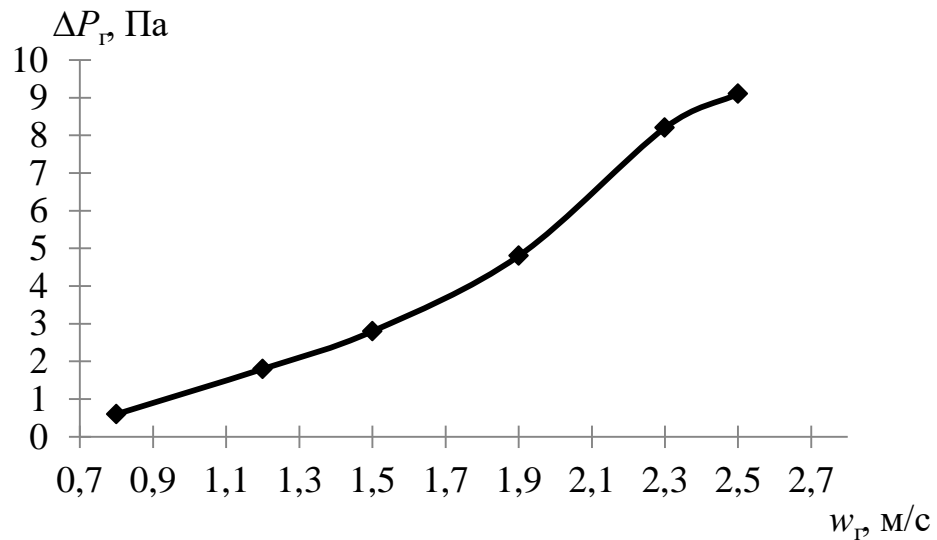


Рисунок 3.6. – Осредненная экспериментальная зависимость перепада давления газа для сухой насадки из гладких труб от скорости воздуха.

Коэффициент гидравлического сопротивления насадки определяется по формуле из выражения Дарси–Вейсбаха [116]

$$\xi = \frac{2d \Delta P}{\rho_{\Gamma} H w_{\Gamma}^2}. \quad (3.4)$$

Экспериментальная осредненная по трем измерениям зависимость перепада давления газа для насадки в виде гладких труб от скорости воздуха при различных плотностях орошения приведена на рис. 3.7.

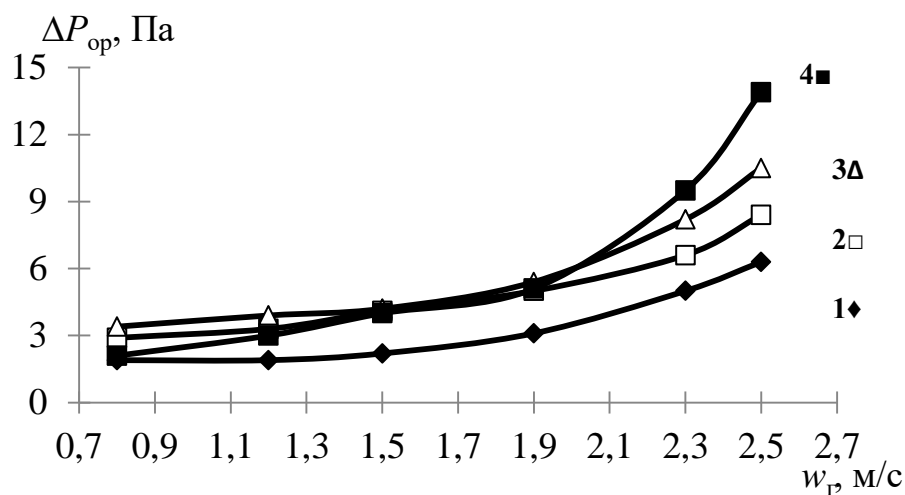


Рисунок 3.7. – Зависимость перепада давления газа для насадки из гладких труб от скорости воздуха. 1 – плотность орошения $q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 2 – $q_{ж} = 12,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 3 – $q_{ж} = 15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, 4 – $q_{ж} = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$.

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления насадки $\zeta_{ор}$ из гладких труб от скорости воздуха приведена на рис. 3.8.

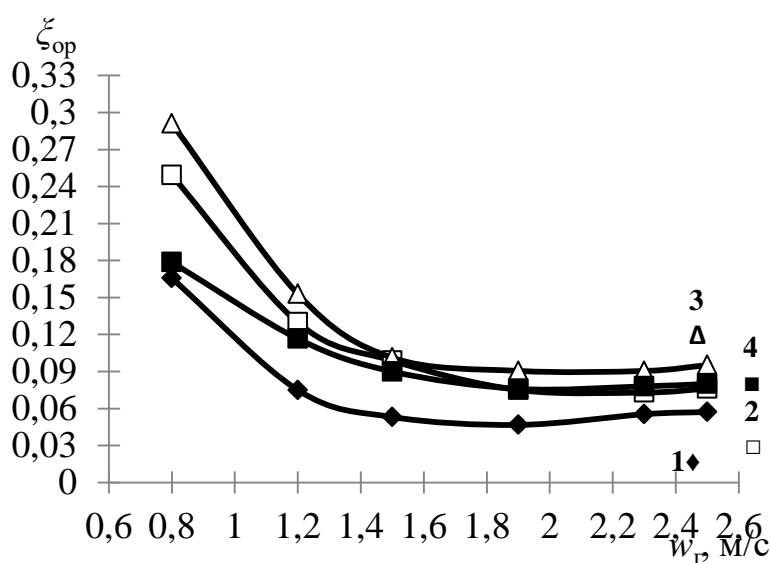


Рисунок 3.8. – Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления насадки из гладких труб от скорости воздуха. 1 – плотность орошения $q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 2 – $q_{ж} = 12,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 3 – $q_{ж} = 15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, 4 – $q_{ж} = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$.

Для турбулентного режима движение воздуха в насадке из гладких труб получена эмпирическая зависимость, которая обобщает экспериментальные данные ($\pm 15\%$) (рис. 3.8)

$$\xi_{\text{ор}} = \xi_{\text{сух}} + 4,0 \cdot 10^{-3} \frac{q_{\text{ж}}}{w_{\Gamma}}, \quad (3.5)$$

где $\xi_{\text{сух}} = 0,316/Re_{\text{э}}^{0,25}$ – коэффициент сопротивления труб без орошения; $8,8 \leq q_{\text{ж}} \leq 19,4$ м³/(м²час); $1,2 \leq w_{\Gamma} \leq 2,6$, м/с; $d_{\text{э}} = 0,033$ м; система воздух – вода при средней температуре 30°C.

Коэффициент массоотдачи определяется по формуле (1.5).

Зависимость коэффициента массоотдачи насадки из гладких труб от скорости воздуха приведена на рис. 3.9.

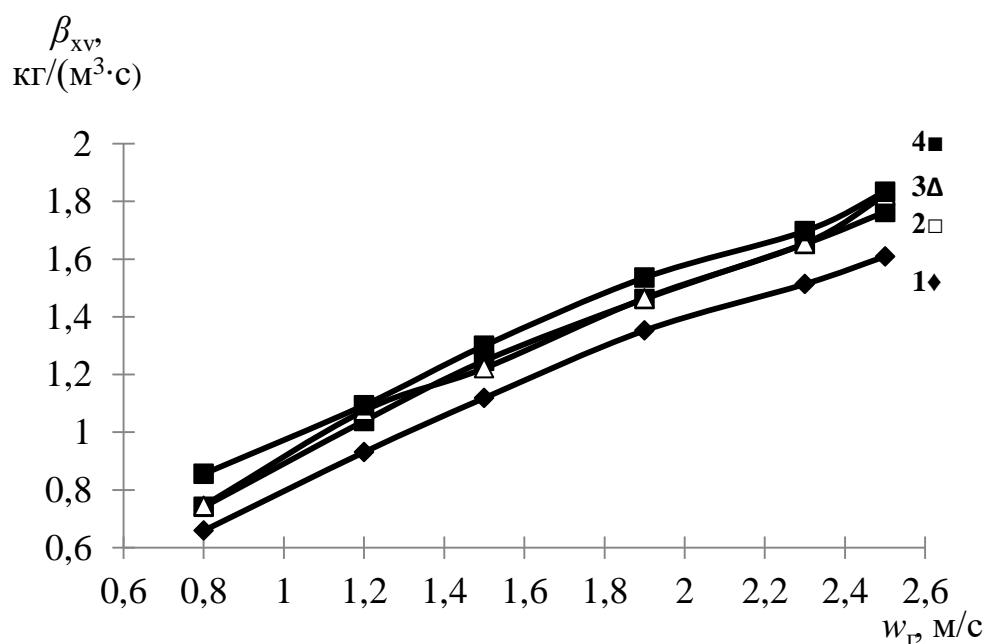


Рисунок 3.9. – Зависимость коэффициента массоотдачи насадки из гладких труб от скорости воздуха. 1 – плотность орошения $q_{\text{ж}} = 8,8$ м³/(м²час); 2 – $q_{\text{ж}} = 12,4$ м³/(м²час); 3 – $q_{\text{ж}} = 15,9$ м³/(м²час), 4 – $q_{\text{ж}} = 19,4$ м³/(м²час).

Эффективность по жидкой и газовой фазе определяется по формуле (3.2).

Зависимость тепловой эффективности по жидкой фазе насадки из гладких труб от скорости воздуха приведена на рис. 3.10 ($H = 1,0$ м).

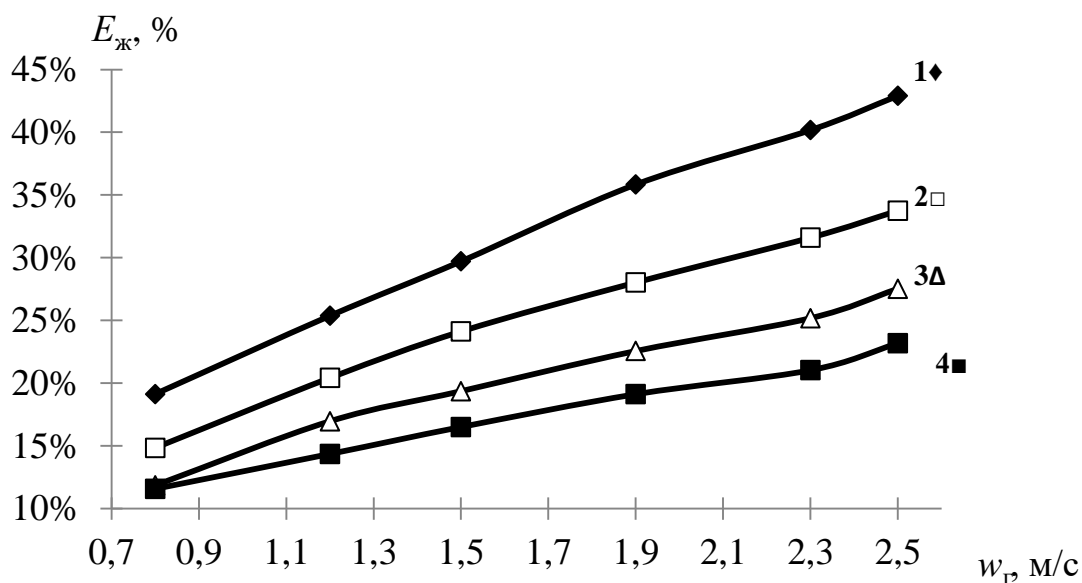


Рисунок 3.10. – Зависимость тепловой эффективности по жидкой фазе насадки из гладких труб от скорости воздуха. 1 – плотность орошения $q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 2 – $q_{ж} = 12,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 3 – $q_{ж} = 15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, 4 – $q_{ж} = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$.

Зависимость тепловой эффективности по газовой фазе насадки из гладких труб от скорости воздуха приведена на рис. 3.11.

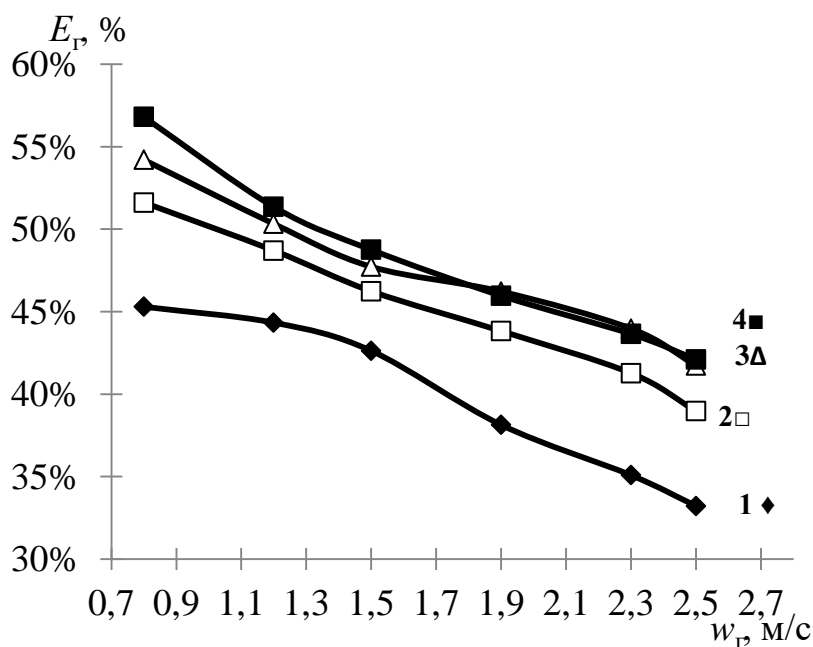


Рисунок 3.11. – Зависимость тепловой эффективности по газовой фазе насадки из гладких труб от скорости воздуха. 1 – плотность орошения $q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 2 – $q_{ж} = 12,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 3 – $q_{ж} = 15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, 4 – $q_{ж} = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$.

3.4.1. Перепад давления и тепломассообмен в колонне с насадкой из шероховатых труб

Зависимость перепада давления газа для сухой насадки из шероховатых труб от скорости воздуха приведена на рис. 3.12 ($H = 1,0$ м).

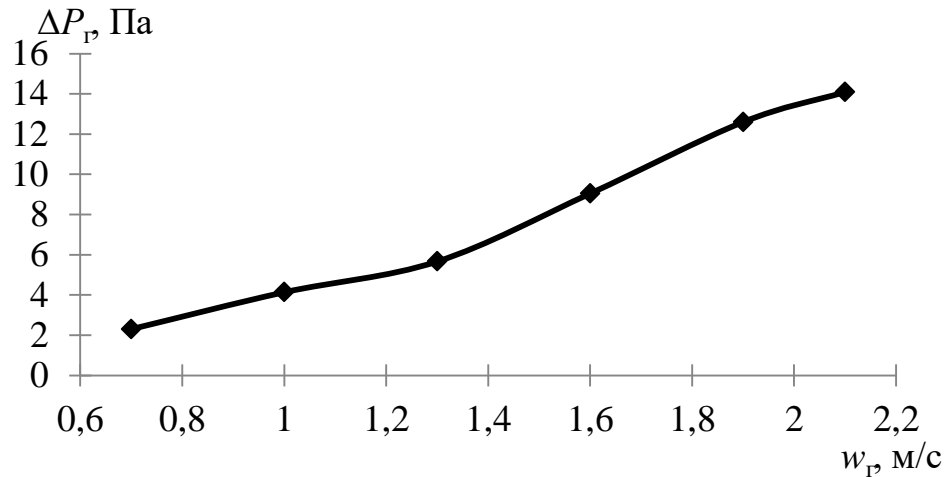


Рисунок 3.12. – Зависимость перепада давления газа для сухой насадки из шероховатых труб от скорости воздуха.

Коэффициент гидравлического сопротивления насадки определяется по формуле (3.4).

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления сухой и орошаемой насадки из шероховатых труб от скорости воздуха приведена на рис. 3.13.

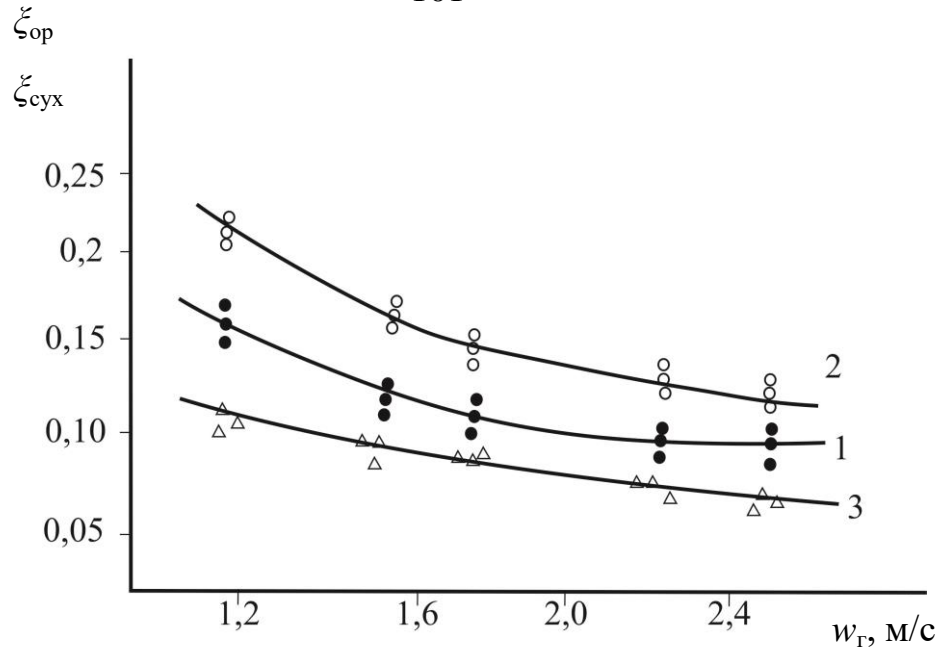


Рисунок 3.13. – Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления сухих и орошаемых шероховатых пучков труб (насадки) от скорости воздуха 1 – $q_{ж}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, 2 – $q_{ж}=19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, 3 – $q_{ж}= 0$; точки экспериментальные данные авторов, сплошные линии – осредненные данные эксперимента: 1,2 – $\xi_{ор}$; 3 – $\xi_{сух}$

В результате обобщения экспериментальных данных (рис. 3.13) для турбулентного режима получено выражение ($\pm 15\%$)

$$\xi_{ор} = \xi_{сух} + 0,23 Re_{ж}^{0,5} / Re_{э}^{0,45}, \quad (3.6)$$

где $\xi_{сух} \approx 2,2 / Re_{э}^{0,38}$ коэффициент сопротивления сухой шероховатой насадки;

$Re_{ж} = 4q_{ж} / (a_v v_{ж})$ – число Рейнольдса для жидкой фазы ($q_{ж}$, $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{сек})$);

$Re_{Г} = w_{Г} d_{э} / \nu_{Г}$ – число Рейнольдса для воздуха.

Интервал применения формулы (3.5):

$2500 \leq Re_{э} \leq 5600$; $8,8 \leq q_{ж} \leq 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; $80 \leq Re_{ж} \leq 250$; $d_{э} = 0,033 \text{ м}$; система воздух – вода при средней температуре 30°C .

Объемный коэффициент массоотдачи определяется по формуле (1.5).

Зависимость коэффициента массоотдачи насадки из шероховатых труб от скорости воздуха при разных плотностях орошения приведена на рис. 3.14.

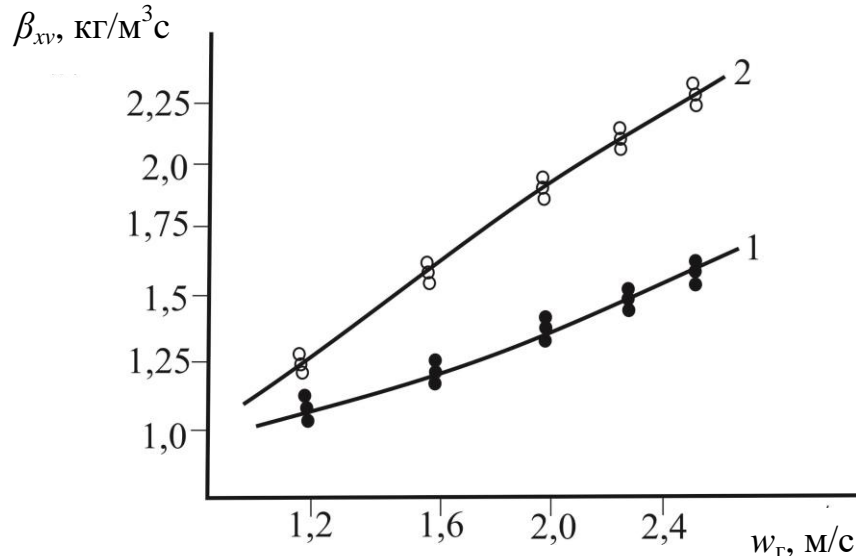


Рисунок 3.14. — Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от скорости воздуха. 1 — $q_{ж} = 8,8$ м³/(м²час), 2 — $q_{ж} = 19,4$ м³/(м²час), точки экспериментальные данные автора, сплошные линии — осредненные данные эксперимента. Регулярная трубчатая насадка с шероховатой поверхностью.

Эффективность по жидкой и газовой фазе определяется по формуле (3.2).

Зависимость тепловой эффективности по жидкой фазе насадки из шероховатых труб от скорости воздуха при различных плотностях орошения приведена на рис. 3.15 ($H = 1,0$ м).

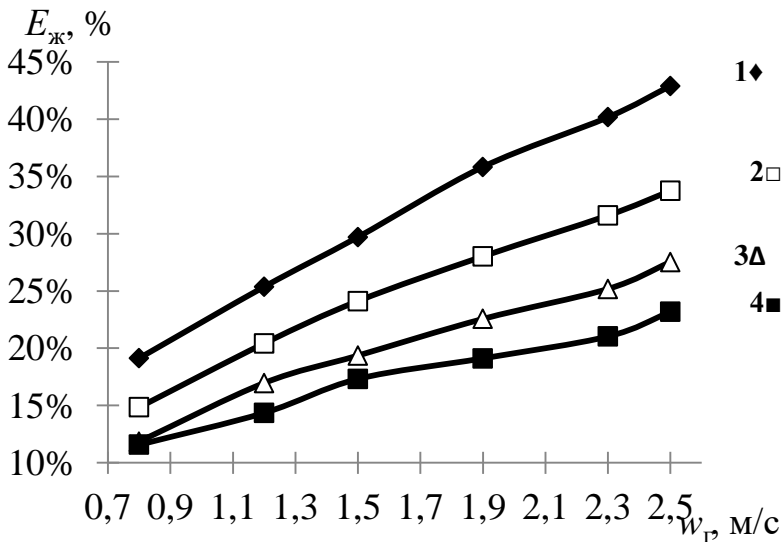


Рисунок 3.15. — Зависимость тепловой эффективности по жидкой фазе насадки из шероховатых труб от скорости воздуха. 1 — плотность орошения $q_{ж} = 8,8$ м³/(м²час); 2 — $q_{ж} = 12,4$ м³/(м²час); 3 — $q_{ж} = 15,9$ м³/(м²час), 4 — $q_{ж} = 19,4$ м³/(м²час).

Зависимость тепловой эффективности по газовой фазе насадки из шероховатых труб от скорости воздуха при различных плотностях орошения приведена на рис. 3.16 ($H = 1,0$ м).

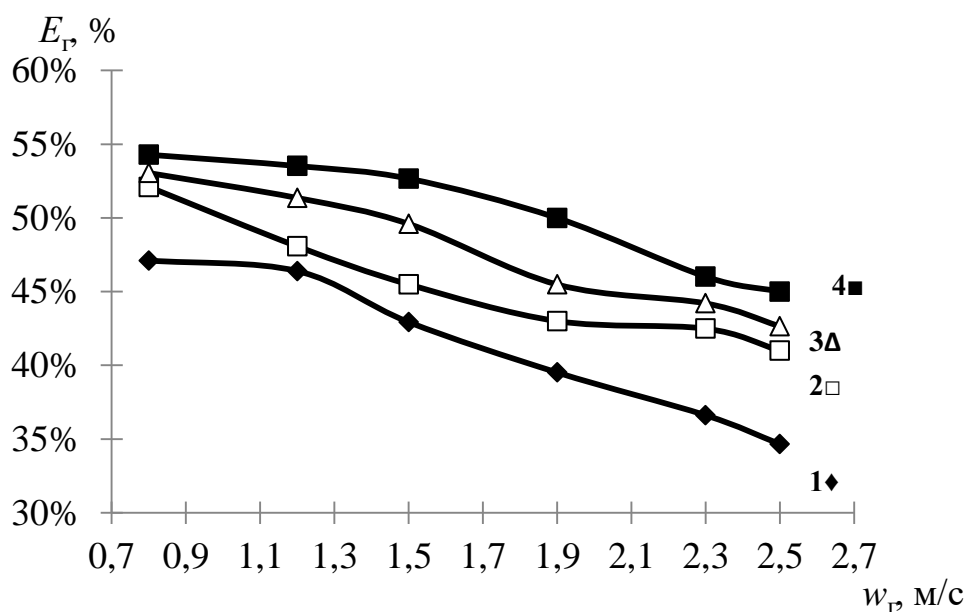


Рисунок 3.16. – Зависимость тепловой эффективности по газовой фазе насадок в виде шероховатых труб от скорости воздуха. 1 – плотность орошения $q_{ж} = 8,8$ м³/(м²час); 2 – $q_{ж} = 12,4$ м³/(м²час); 3 – $q_{ж} = 15,9$ м³/(м²час), 4 – $q_{ж} = 19,4$ м³/(м²час).

3.4.2. Колонна с комбинированными насадками из шероховатых полимерных труб

Зависимость перепада давления газа для сухих комбинированных насадок из шероховатых труб (полиэтиленовые шероховатые трубы 50 мм ($H = 1,0$ м) с верхним хаотичным слоем ($H = 0,2$ м) из полиэтиленовых колец (50x50 мм), выполненных из тех же труб, что и регулярная шероховатая насадка) от скорости воздуха приведена на рис. 3.17.

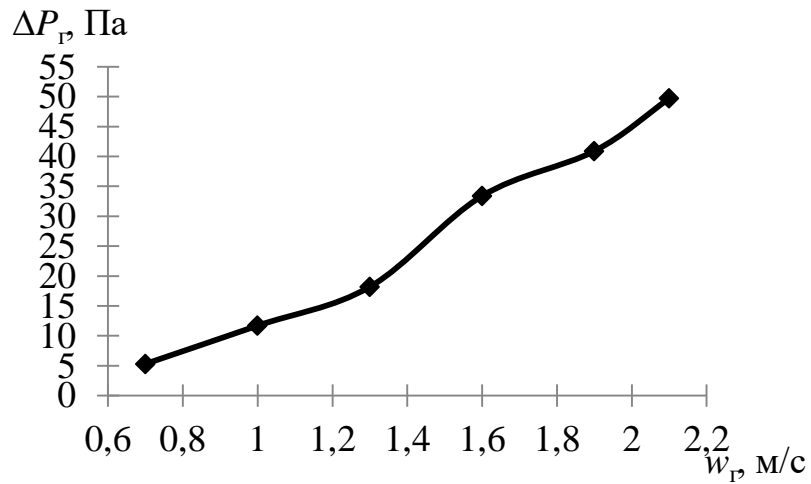


Рисунок 3.17. – Зависимость перепада давления газа для сухих комбинированных насадок из шероховатых труб от скорости воздуха ($H = 1,2$ м).

Зависимость перепада давления газа комбинированных насадок из шероховатых труб от скорости воздуха приведена на рис. 3.18 ($H=1,2$ м).

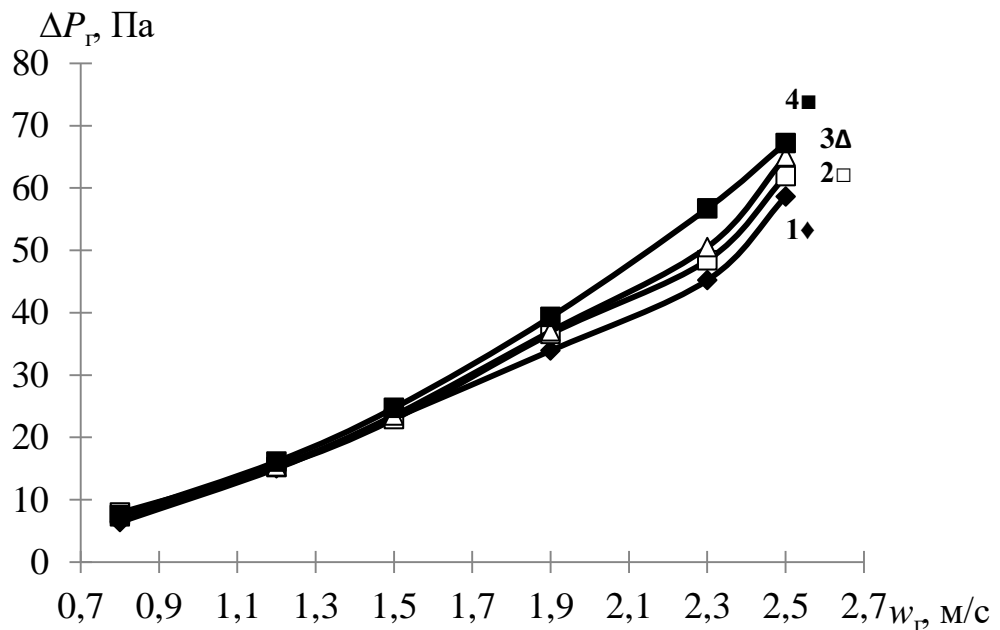


Рисунок 3.18. – Зависимость перепада давления газа комбинированных насадок из шероховатых труб от скорости воздуха. 1 – плотность орошения $q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 2 – $q_{ж} = 12,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 3 – $q_{ж} = 15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, 4 – $q_{ж} = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$.

Эффективность по жидкой и газовой фазе определяется по формуле (3.2).

Зависимость эффективности в газовой фазе комбинированных насадок из шероховатых труб от скорости воздуха приведена на рис. 3.19 ($H = 1,2$ м).

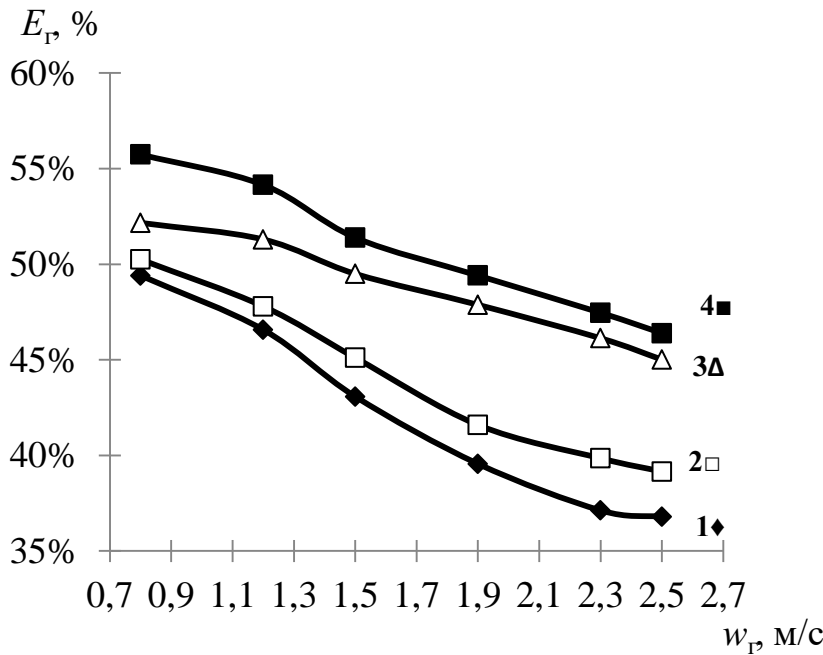


Рисунок 3.19. – Зависимость эффективности в газовой фазе комбинированных насадок из шероховатых труб от скорости воздуха. 1 – плотность орошения $q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 2 – $q_{ж} = 12,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 3 – $q_{ж} = 15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, 4 – $q_{ж} = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$.

Зависимость эффективности жидкой фазы комбинированных насадок из шероховатых труб от скорости воздуха приведена на рис. 3.20.

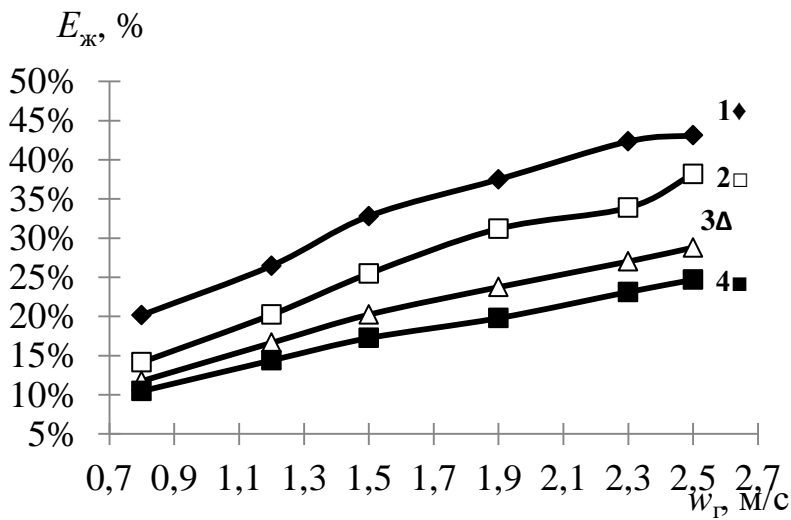


Рисунок 3.20. – Зависимость эффективности жидкой фазы комбинированных насадок из шероховатых труб от скорости воздуха. 1 – плотность орошения $q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 2 – $q_{ж} = 12,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 3 – $q_{ж} = 15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, 4 – $q_{ж} = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$.

3.4.3. Колонна с комбинированными насадками из шероховатых полимерных труб и хаотичных насадок «Инжехим–2012»

Зависимость перепада давления сухих комбинированных насадок из шероховатых труб и «Инжехим–2012» (полиэтиленовые шероховатые трубы 50 мм ($H = 1,0$ м) с верхним хаотичным слоем ($H = 0,2$ м) из хаотичной насадки «Инжехим») от скорости воздуха приведена на рис. 3.21.

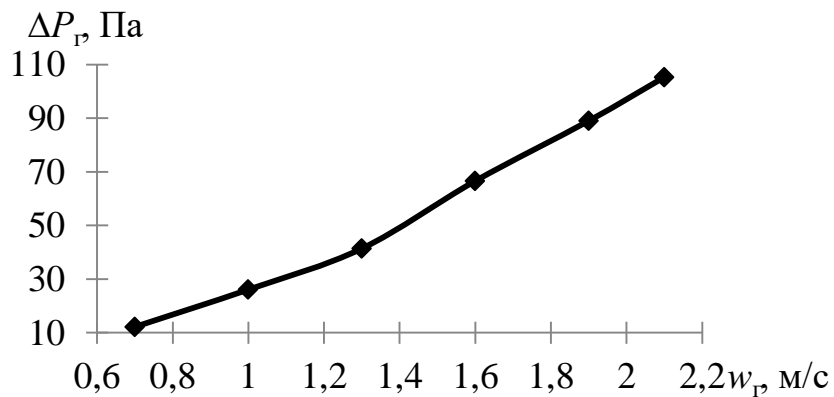


Рисунок 3.21. – Зависимость перепада давления сухих комбинированных насадок из шероховатых труб и «Инжехим–2012» от скорости воздуха ($H = 1,2$ м).

Зависимость перепада давления комбинированных насадок из шероховатых труб и «Инжехим–2012» от скорости воздуха приведена на рис. 3.22 ($H = 1,2$ м).

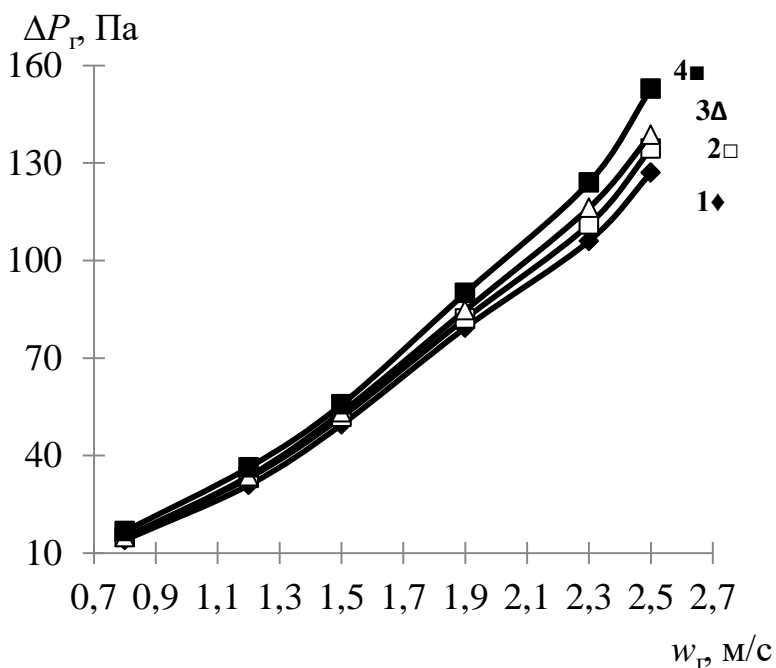


Рисунок 3.22. – Зависимость перепада давления комбинированных насадок из шероховатых труб и «Инжехим–2012» от скорости воздуха. 1 – плотность орошения $q_{ж} = 8,8$ м³/(м²час); 2 – $q_{ж} = 12,4$ м³/(м²час); 3 – $q_{ж} = 15,9$ м³/(м²час), 4 – $q_{ж} = 19,4$ м³/(м²час).

Коэффициент гидравлического сопротивления определяется по формуле (3.4).

Эффективность по жидкой и газовой фазе определяется по формулам (3.2).

Зависимость эффективности в газовой фазе комбинированных насадок из шероховатых труб и «Инжехим–2012» от скорости воздуха приведена на рис. 3.23 ($H = 1,2$ м).

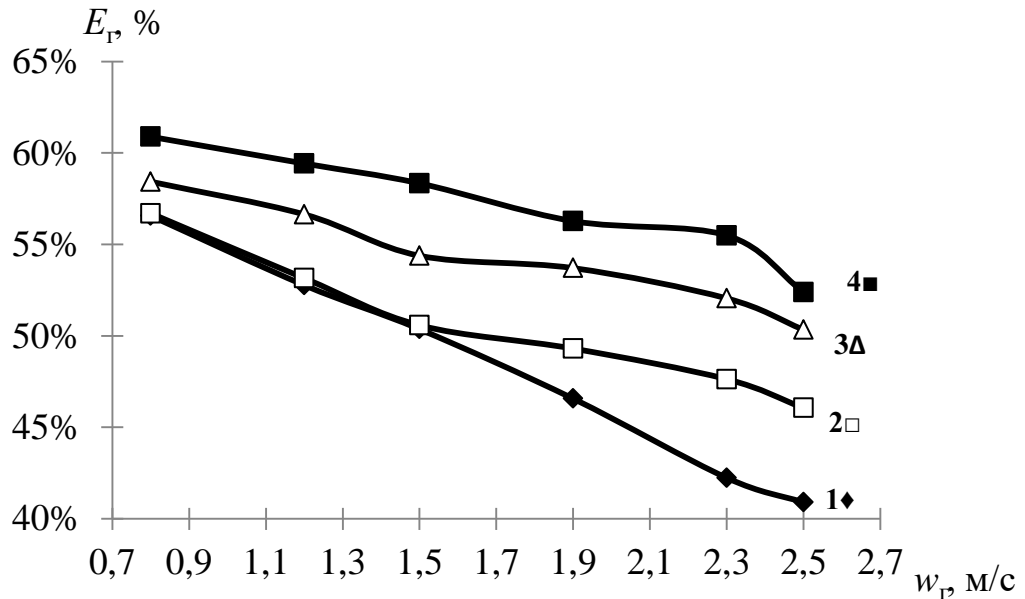


Рисунок 3.23. – Зависимость эффективности в газовой фазе комбинированных насадок из шероховатых труб и «Инжехим–2012» от скорости воздуха. 1 – плотность орошения $q_{ж} = 8,8$ м³/(м²час); 2 – $q_{ж} = 12,4$ м³/(м²час); 3 – $q_{ж} = 15,9$ м³/(м²час), 4 – $q_{ж} = 19,4$ м³/(м²час).

Зависимость эффективности в жидкой фазе комбинированных насадок из шероховатых труб и «Инжехим–2012» приведена на рис. 3.24 ($H = 1,2$ м).

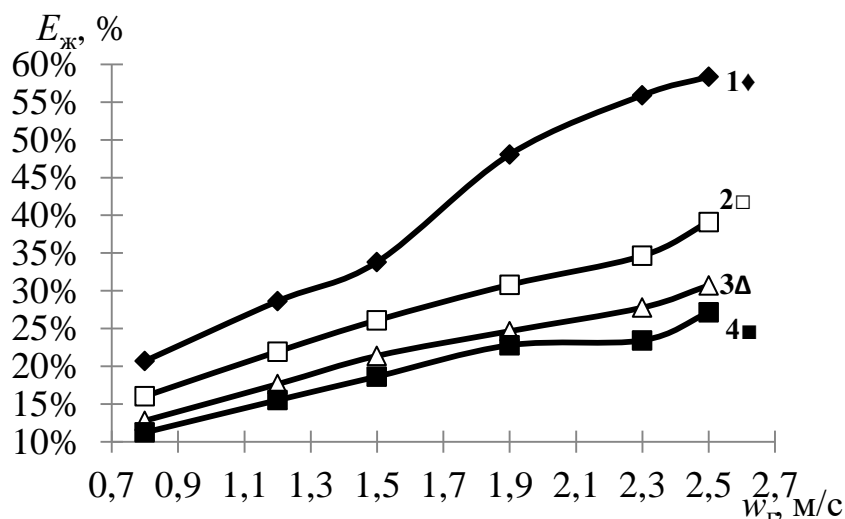


Рисунок 3.24. – Зависимость эффективности в жидкой фазе комбинированных насадок из шероховатых труб и «Инжехим–2012» от скорости воздуха. 1 – плотность орошения $q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 2 – $q_{ж} = 12,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 3 – $q_{ж} = 15,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, 4 – $q_{ж} = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$.

Для комбинированной насадки с хаотичной «Инжехим 2012» (16 мм) зависимость объемного коэффициента массоотдачи получена в виде ($\pm 10\%$)

$$\beta_{xv} = 0,198 q_{ж}^{1,02} (G / L)^{0,75}. \quad (3.7)$$

где $G = w_{г} \rho_{г} S_{к}$, кг/с; $L = q_{ж} \rho_{ж} S_{к}$, кг/с; $G/L = (0,15 - 1,12)$; $q_{ж} = (8,8 - 19,4) \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$.

3.5. Обобщение полученных результатов

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно отметить основные закономерности гидравлических и тепломассообменных характеристик процесса охлаждения воды в регулярных и комбинированных насадках.

При подаче воды значение перепада давления зависит от плотности орошения (рис. 3.25). Очевидно, что перепад давления комбинированного слоя с насадкой «Инжехим–2012» больше, чем из колец, из-за более высокой удельной поверхности слоя.

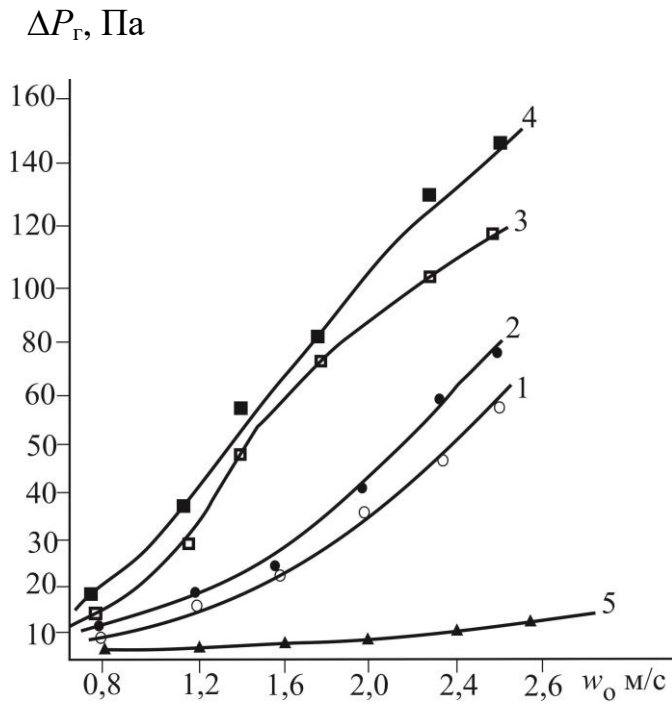


Рис. 3.25. – Зависимость перепада давления комбинированных насадочных слоев от скорости воздуха. 1,2 – комбинация с кольцами; 3,4 – комбинация с «Инжехим–2012». 1,3 – плотность орошения $q_{ж}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 2,4 – $q_{ж}=19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 5 – трубы без верхнего слоя при $q_{ж}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 1–4 – $H = 1,2 \text{ м}$; 5 – $H = 1,0 \text{ м}$.

Перепад давления орошаемой комбинированной насадки из шероховатых труб и «Инжехим2012» (верхний слой) будет суммой

$$\Delta P_{op} = \left(\frac{2,2}{Re_{\text{э}1}^{0,38}} + 0,23 Re_{\text{ж}}^{0,5} / Re_{\text{э}}^{0,45} \right) \frac{H_1 \rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}{2d_{\text{э}1}} + \left(\frac{6,5}{Re_{\text{э}2}^{0,135}} \cdot 10^{0,002q_{\text{ж}}} \right) \frac{H_2 \rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}{2d_{\text{э}2}}, \quad (3.8)$$

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

Для насадки «Инжехим – 2012» используется множитель, учитывающий орошение в виде $10^{0,002q_{\text{ж}}}$, полученный в работе [142], где $q_{\text{ж}}$ имеет размерность, $\text{м}^3/(\text{м}^2\text{час})$.

Например, при $w_{\Gamma} = 1,5 \text{ м/с}$ и $q_{\text{ж}} = 19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$, по формуле (3.8) получаем $\Delta P_{op} = 63 \text{ Па}$. Экспериментальное значение (рис. 3.25) $\Delta P_{op} = 60 \text{ Па}$. При $w_{\Gamma} = 2,4 \text{ м/с}$ получаем $\Delta P_{op} = 124 \text{ Па}$; эксперимент – $\Delta P_{op} = 130 \text{ Па}$.

На рисунке 3.26. даны экспериментальные зависимости объемных коэффициентов массоотдачи (1.5) 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 в работе [102, 127], меньше в 1,5–3 раза (кривая 6).

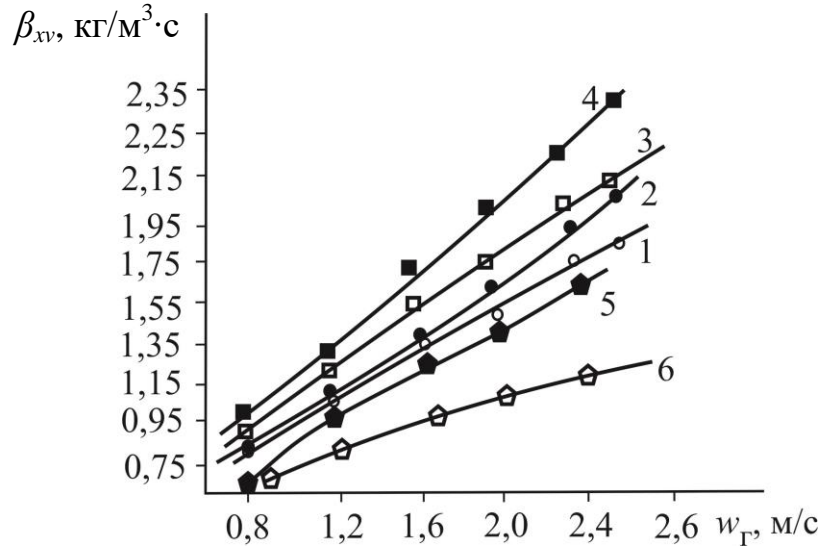


Рисунок 3.26. – Зависимость объемных коэффициентов массоотдачи различных насадок от скорости воздуха. Комбинированная насадка с кольцами (кривые 1,2) и «Инжехим–2012» (кривые 3,4) 1,3 – $q_{ж}=8,8$ м³/(м²час); 2,4 – $q_{ж}=19,4$ м³/(м²час); 5 – гладкие трубы; 6 – сетчатая насадка [127] при $q_{ж}=8,8$ м³/(м²час);

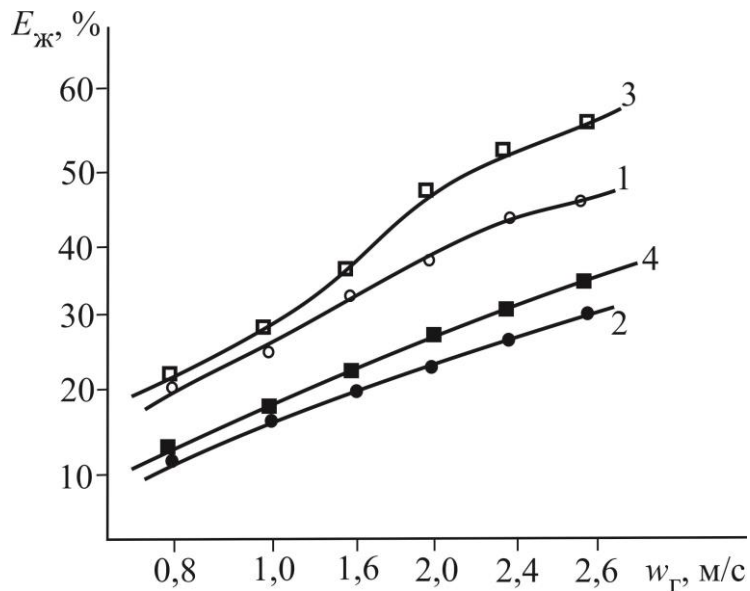


Рисунок 3.27. – Зависимость эффективности охлаждения воды от скорости воздуха. 1,2 – комбинация с кольцами; 3,4 – комбинация с «Инжехим–2012». 1,3 – плотность орошения $q_{ж}=8,8$ м³/(м²час); 2,4 – $q_{ж}=19,4$ м³/(м²час) ($H=1,2$ м).

На рисунках 3.27 и 3.28 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 $E_{ж}$ при увеличении скорости воздуха повышается, а в газовой фазе $E_{г}$ – понижается. Повышение $E_{ж}$ объясняется большим притоком охлаждающего воздуха и его турбулизацией. Снижение $E_{г}$ при увеличении скорости $w_{г}$ происходит из-за зависимости теплового числа единиц переноса $N_{г} = \beta_{хв} S_{к} H / (\rho_{г} V_{г})$, где числитель повышается при увеличении $w_{г}$ примерно в степени 0,7–0,8 (коэффициент массоотдачи), а знаменатель в первой степени (расход воздуха). Это в итоге дает понижение $N_{г} \sim w_{г}^{-(0,2-0,3)}$, что и вызывает уменьшение тепловой эффективности $E_{г}$ в газовой фазе, исходя из законов теплообмена.

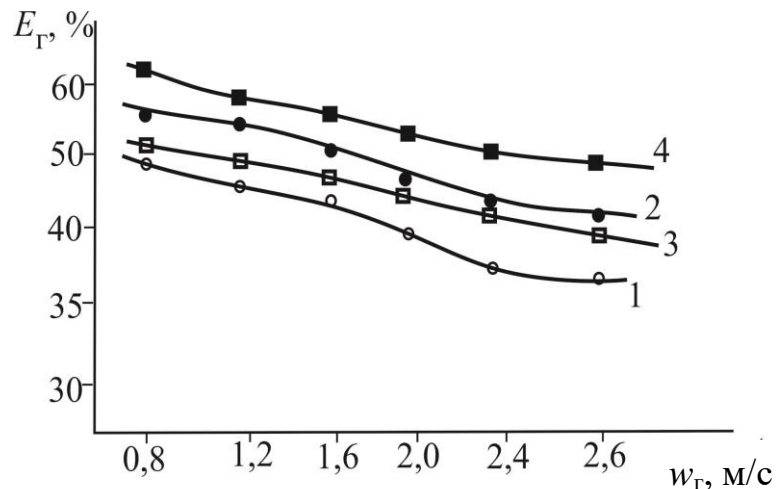


Рисунок 3.28. – Зависимость тепловой эффективности в газовой фазе от скорости воздуха при различной плотности орошения. 1,2 – комбинация с кольцами; 3,4 – комбинация с «Инжехим–2012». 1,3 – плотность орошения $q_{ж}=8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$; 2,4 – $q_{ж}=19,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$ ($H = 1,2 \text{ м}$).

3.6. Сравнение коэффициентов массоотдачи, полученных экспериментально, с расчетом по математическим моделям

Блоки оросителей градирен, работающие в пленочном режиме при противотоке с газовой фазой, относятся к классу пленочных контактных устройств (аппаратов), для которых в литературе во второй половине прошлого столетия и в начале XXI века получено довольно много экспериментальных данных и разработаны математические модели многими отечественными и зарубежными авторами. Однако из-за большого разнообразия конструкций пленочных контактных устройств исследования продолжают и в настоящее время.

Классикой является гидродинамическая аналогия Рейнольдса, Прандтля, Кармана, и далее развитая Чилтоном – Кальборном и многими другими. Гидродинамическая аналогия позволяет вычислить коэффициенты тепло- и массоотдачи на основе применения коэффициента трения, исключая местные сопротивления. Кроме этого для турбулентного режима используется допущение $Sc_T \approx 1$ и $Pr_T \approx 1$, где Sc_T и Pr_T – турбулентные числа Шмидта и Прандтля. В турбулентных потоках гидродинамическая аналогия рассматривается в приближении гидродинамического и диффузионного пограничных слоев.

По аналогии Чилтона – Кальборна для гладких каналов, (т.е. без поверхностных интенсификаторов, которые создают местные сопротивления) записывается число Стантона

$$St_{\Gamma} = \frac{C_f}{2Pr_{\Gamma}^{2/3}}, \quad St_D = \frac{C_f}{2Sc_{\Gamma}^{2/3}}, \quad (3.9)$$

где $C_f = 2\tau_{ct}/(\rho u_{\infty}^2)$ — коэффициент трения; τ_{ct} – касательное напряжение трения на стенке, Па; u_{∞} – скорость потока, м/с; St – число Стантона.

Для трубы с однофазным потоком из уравнения баланса сил известна связь $C_f = \xi/4$. Для насадочных колонн с хаотичными элементами эта зависимость весьма приближенная из-за сужения и расширения потока местных сопротивлений формы насадки.

Гидродинамическую аналогию (3.11) для массообменного процесса запишем, используя число Шервуда

$$Sh_{\Gamma} = \xi Re_{\vartheta} Sc_{\Gamma}^{1/3} / 8. \quad (3.10)$$

где $Sh = \beta d / D$; β – коэффициент массоотдачи, м/с; $Re = u_{\infty} d / \nu$ – число Рейнольдса; d – диаметр трубы, м.

При стекании пленки жидкости на межфазной поверхности образуются волны, которые, по предложению академика П.Л. Капицы, можно представить как нерегулярную шероховатость при расчете коэффициентов тепло- и массоотдачи в газовой фазе. Это дает основание применять выражения для чисел Nu и Sh , полученные для шероховатых каналов.

Критериальное выражение С.С. Кутателадзе

$$Sh_{\Gamma} = 0,14 \sqrt{\xi} Re_{\vartheta} Sc_{\Gamma}^{1/3} \left[\ln \frac{Re_{\vartheta} \sqrt{\xi}}{290} + 4,6 Sc_{\Gamma} \right]^{-1}. \quad (3.11)$$

Уравнение, полученное в результате модификации гидродинамической аналогии [115, 129]

$$Sh_{\Gamma} = 0,158 Re_{\vartheta}^{0,85} Sc_{\Gamma}^{0,33} (\xi / 8)^{0,429}. \quad (3.12)$$

Выражение, полученное на основе двухслойной модели турбулентного пограничного слоя [129]

$$Sh_{\Gamma} = \frac{Re_{\vartheta} Sc_{\Gamma}^{0,33} \sqrt{\xi / 8}}{6,52 (Re_{\vartheta}^{0,125} \xi^{0,5})^{-1} + 2,5 \ln(0,0135 Re_{\vartheta}^{1,125} \xi)}. \quad (3.13)$$

Первоначально используем экспериментальные данные, полученные для регулярной насадки из вертикальных гладких труб (раздел 3.2.1 и приложение 1). Для этого на основе экспериментального объемного коэффициента массотдачи β_{xv} , кг/(м³с) найдем средний поверхностный коэффициент β_{Γ} , м/с

$$\beta_{\Gamma} = \frac{\beta_{xv}}{a_v \psi_w \rho_{\Gamma}}. \quad (3.14)$$

Важное значение имеет достоверное определение коэффициента смачиваемости ψ_w поверхности насадки, т.к. в зависимости от удельной поверхности a_v и плотности орошения не вся поверхность бывает смоченной.

Для трубчатых насадок диаметром 50 мм коэффициент смоченной поверхности [116]

$$\psi_w = \frac{q_{ж}}{a_v(0,0194 + 0,0086q_{ж})}. \quad (3.15)$$

Из данного выражения следует, что при $a_v = 110 \text{ м}^2/\text{м}^3$ только при $q_{ж} > 25 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$ коэффициент $\psi_w = 1$, т.е. вся поверхность является смоченной. Но это не всегда означает, что вся смоченная поверхность участвует в тепломасообмене с газовым потоком. Необходимо учитывать, что соприкосновение поверхности трубок друг с другом, соприкосновение трубок, расположенных по периметру колонны со стенками. В точках соприкосновения образуются локальные зоны с жидкостью, которая не контактирует через межфазную поверхность с газовым потоком. Применяется так называемый коэффициент соприкосновения, который для регулярных насадок $\psi_o = 0,9$, а для хаотичных $\psi_o = 0,8$. Таким образом, площадь поверхности контакта фаз в трубчатой насадке будет примерно равна $F = SHa_v\psi_w\psi_o, \text{ м}^2$.

В таблице 3.7 представлены данные по массоотдаче после обработки экспериментальных данных для насадки из гладких труб ($H=1,0 \text{ м}$) по формуле (3.12) и числу Шервуда $Sh_r = \beta_r d_o / D_r$.

Таблица 3.7. – Обработанные экспериментальные данные по массоотдаче в насадке с гладкими трубами

№	w_{Γ} , м/с	Re_{Γ}	ξ_{op}	β_{xv} , кг/(м ³ с)	β_{Γ} , м/с	Sh_{Γ}
$Re_{ж} = 90,0; q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$						
1	0,82	1690	0,166	0,658	$6,2 \cdot 10^{-3}$	9,3
2	1,2	2475	0,075	0,93	$8,7 \cdot 10^{-3}$	13,2
3	1,54	3176	0,053	1,118	0,0105	15,8
4	1,94	4000	0,047	1,356	0,013	19,2
5	2,26	4660	0,055	1,513	0,0143	21,5
6	2,5	5150	0,057	1,61	0,015	22,5
$Re_{ж} = 130; q_{ж} = 12,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$						
7	0,82	1690		0,741	$6,5 \cdot 10^{-3}$	9,75
8	1,2	2475	0,086	1,039	$9,1 \cdot 10^{-3}$	13,7
9	1,54	3176	0,074	1,248	0,011	16,5
10	1,94	4000	0,066	1,462	0,013	19,5
11	2,26	4660	0,06	1,653	0,0145	21,8
12	2,5	5150	0,057	1,764	0,016	24,0

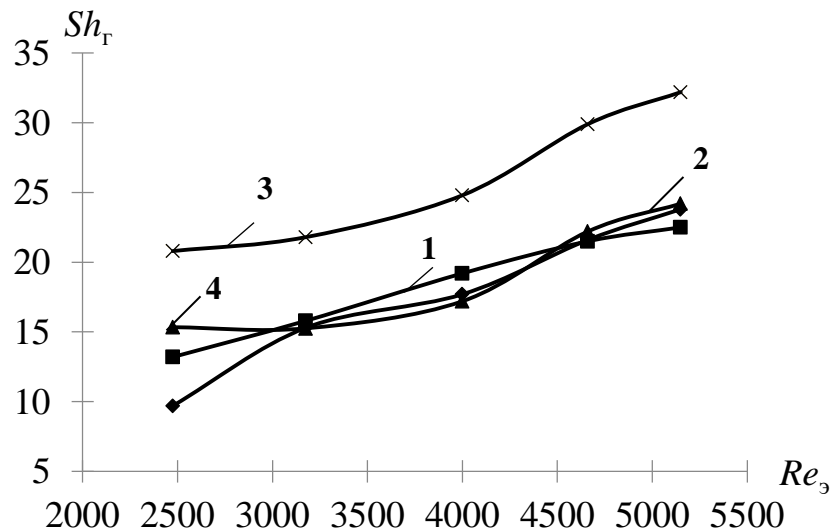


Рисунок 3.29. – Зависимость числа Шервуда от Рейнольдса для теплообмена в насадке из гладких труб при плотности орошения $q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$. 1 – экспериментальные данные; 2 – расчет по формуле (3.10); 3 – расчет по выражению Кутателадзе (3.9); 4 – расчет по формуле (3.11).

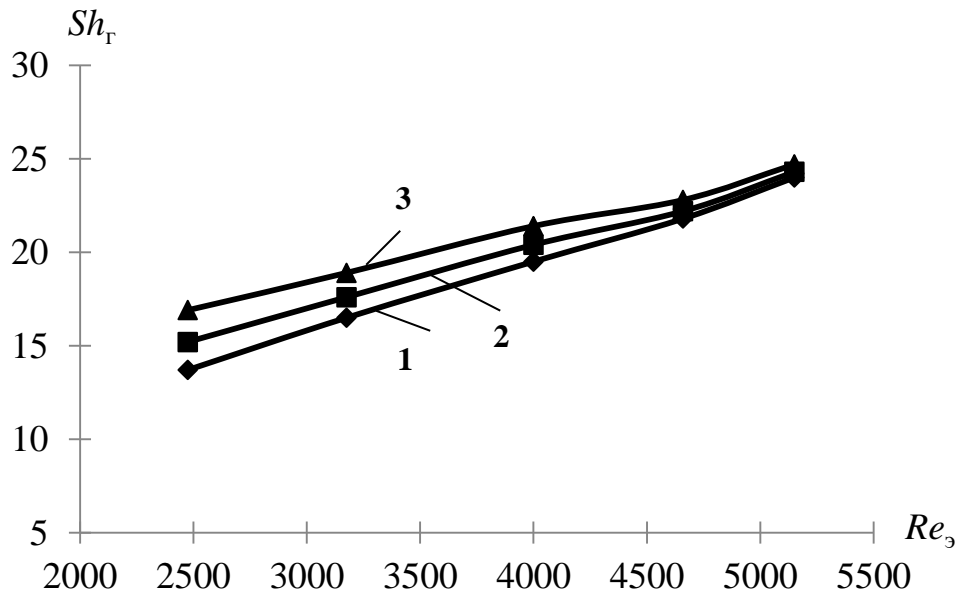


Рисунок 3.30. – Зависимость числа Шервуда от Рейнольдса для теплообмена в насадке из гладких труб при плотности орошения $q_{ж} = 12,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$. 1 – экспериментальные данные; 2 – расчет по формуле (3.10); 3 – расчет по формуле (3.11).

В таблице 3.8 представлены обработанные экспериментальные данные для насадки из шероховатых труб ($H=1,0 \text{ м}$).

Таблица 3.8. – Гидравлические и массообменные характеристики процесса в шероховатой насадке

№	$w_{г}, \text{ м/с}$	$Re_{г}$	$\xi_{оп}$	$\beta_{хв}, \text{ кг}/(\text{м}^3\text{с})$	$\beta_{г}, \text{ м/с}$	$Sh_{Г}$
$Re_{ж} = 90,0; q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$						
1	0,82	1690	0,21	0,83	$7,8 \cdot 10^{-3}$	11,7
2	1,2	2475	0,168	1,11	0,01	15,0
3	1,54	3176	0,15	1,22	0,011	16,5
4	1,94	4000	0,14	1,37	0,0129	19,4
5	2,26	4660	0,13	1,55	0,0145	21,7
6	2,5	5150	0,12	1,71	0,016	24,0

На рис. 3.31 представлена зависимость числа Шервуда от Рейнольдса по данным таблиц 3.7 и 3.8 при плотности орошения $q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$.

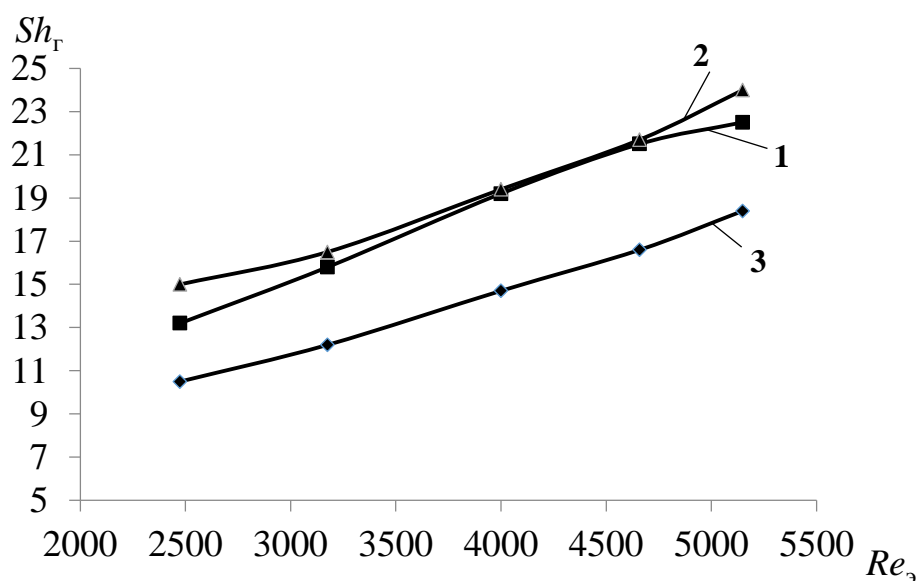


Рисунок 3.31. – Зависимость числа Шервуда от Рейнольдса в насадке из гладких и шероховатых труб при плотности орошения $q_{ж} = 8,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$. 1 – гладкие трубы; 2 – шероховатые трубы; 3 – одна орошаемая труба [116].

Из представленных экспериментальных и расчетных результатов (табл. 3.7, 3.8), (рис. 3.29–3.31), можно сделать следующие выводы.

Расчет по выражению Кутателадзе (3.11) дает завышенное значение числа Sh_T по сравнению с экспериментальным (рис. 3.29). Еще большее расхождение при применении аналогии Чилтона – Кольборна (3.9), на рис. 3.29 не показана. Выражения (3.14) и (3.15) обеспечивают удовлетворительное согласование с экспериментом. При $Re_3 > 3000$ расхождение в пределах $\pm 15\%$.

Выводы

Физическое и математическое моделирование проводимых процессов является важной составляющей при разработке новых конструкций аппаратов или модернизации действующих. В настоящее время известны сотни разнообразных

конструкций контактных устройств для процессов тепломассообмена в газожидкостных средах, в частности в пленочных градирнях. Однако в ряде случаев отсутствуют экспериментальные данные по ряду важных характеристик градирен, таких как гидравлическое сопротивление, коэффициенты тепломассоотдачи и эффективность теплообмена по жидкой и газовой фазам.

В результате выполненных экспериментальных исследований для регулярных и комбинированных насадок на макете градирни получены расчетные выражения для:

- коэффициента гидравлического сопротивления гладких насадок из труб (выражение (3.5));
- коэффициента гидравлического сопротивления насадок из труб с регулярной шероховатостью (выражение (3.6));
- перепада давления комбинированного слоя (выражение (3.8));
- объемного коэффициента массоотдачи комбинированных насадок (выражение (3.7)).

Сделан сравнительный анализ уравнений различных авторов для числа Шервуда в газовой фазе с полученными экспериментальными данными для регулярных насадок. Сделаны выводы о применимости пленочных градирен.

Одним из перспективных направлений развития конструкций контактных устройств (блоков оросителей градирен) является комбинация различных типов, что позволяет снизить их стоимость и повысить эффективность охлаждения воды. Исследованные в данной работе два вида комбинированных насадок – регулярной и нерегулярной (хаотичной) позволяют повысить эффективность охлаждения воды на 15–35% по сравнению с применением только регулярной насадки. Представлены и сделаны выводы по полученным графическим зависимостям объемного коэффициента массоотдачи и тепловой эффективности по жидкой (воде) и газовой (воздуху) фазам.

Экспериментальные данные и полученные расчетные выражения могут применяться при проектировании или модернизации пленочных градирен на различных промышленных предприятиях и тепловых станциях.

ГЛАВА 4. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОМАССООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВОДЫ В ГРАДИРНЯХ С КОМБИНИРОВАННЫМИ БЛОКАМИ ОРОСИТЕЛЕЙ

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

Рассмотрена замена крупномасштабной градирни диаметром 20 метров (СК-400), на несколько мини градирен с высокими удельными нагрузками и снижением энергозатрат. Из данных промышленной эксплуатации и сделанных расчетов следует, что крупногабаритная градирня СК-400 малоэффективна по сравнению с мини градирней. Снижаются энергозатраты на подачу воздуха с применением мини градирен на 40%. Показаны преимущества применения мини градирен с современными регулярными насадками [143-146].

4.1. Теплогидравлическая эффективность охлаждения воды в мини градирне с регулярной насадкой

Мини градирни характеризуются повышенной удельной производительностью с небольшими габаритными размерами по сравнению с другими вентиляторными. Достоинство мини градирен в том, что их можно размещать в непосредственной близости к технологическим установкам, где требуется охлаждение циркуляционной воды, что позволяет обойтись без создания общего водооборотного цикла промышленного предприятия или производства.

В данной работе рассмотрено применение в мини-градирне регулярной гофрированной насадки, которая успешно внедряется на предприятиях нефтегазохимического комплекса РФ [130, 141, 147, 148].

Насадка состоит из пакетов гофрированных листов 1, установленных один над другим слоями (рис. 2.11 во второй главе). Центральный пакет в слое выполнен в виде цилиндра 2, остальные пакеты размещены в виде долей коаксиальных цилиндров 3. Гофры листов расположены под углом к горизонту, а в смежных листах пакета – перекрестно. В зависимости от геометрических характеристик (высоты гофры) удельная поверхность насадки $a_v = 180 \dots 300 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем $\varepsilon_{св} \approx 0,9 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Насадку изготавливают из тонкой металлической ленты, иногда с микрорельефом (искусственной шероховатостью) или просечками. Для снижения себестоимости насадка может быть изготовлена из полимерных материалов.

Результаты гидравлических исследований данной насадки приведены в работе [117], а также в разделе 2.4.

Коэффициент сопротивления сухой насадки

$$\xi_o = 3,89 Re_o^{-0,294} \quad (4.1)$$

Перепад давления на орошаемой насадке связан с перепадом давления на сухой насадке:

$$\Delta p_{ор} / \Delta p_{сух} = 10^{0,0082q} \quad (4.3)$$

где q – плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Удельная задержка жидкости обобщена выражением

$$\varepsilon_{ж} = 0,625 Re_{ж}^{0,186} Ga^{-0,23}, \quad (4.4)$$

где $Re_o = w_T d_o / \nu_T$ – число Рейнольдса по газовой фазе; $Re_{ж} = 4q / (\nu_{ж} a_v)$ – число Рейнольдса по жидкой фазе; $Ga = g / (\nu_{ж}^2 a_v^3)$ – число Галилея; d_o – эквивалентный диаметр насадки, м.

Рассмотрим режим работы мини градирни при противотоке фаз при $q_{ж} = 10-40 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$, $w_{г} = 1,0-2,5 \text{ м/с}$, т.е. при пленочном режиме. Удельная поверхность насадки (с высотой гофры 20 мм) $a_v = 250 \text{ м}^2/\text{м}^3$, $d_3 = 0,0144 \text{ м}$.

Для определения тепловой эффективности градирни использованы ячеечная модель и модель идеального вытеснения, которые для предлагаемой конструкции регулярной насадки дают практически одинаковые результаты, так как $Pe_{г} > 20$, где $Pe_{г} = w_{г}H/D_{п}$ – модифицированное число Пекле для насадки; H – высота слоя насадки, м; $D_{п}$ – коэффициент обратного перемешивания, $\text{м}^2/\text{с}$ [116]. Модифицированное число $Pe_{г}$ характеризует обратное перемешивание потока.

Первоначально вычисляется гидравлическое сопротивление орошаемого слоя, затем – числа Нуссельта и Шервуда, средние коэффициенты тепло- и массоотдачи и далее тепловая эффективность $E_{г}$ по газовой фазе. При известном значении $E_{г}$ тепловая эффективность охлаждения воды $E_{ж}$ определяется по приближенному соотношению [129]

$$E_{ж} = \left[1 + \left(\frac{1}{E_{ж}} - 1 \right) \frac{L c_{pж}}{G c_{pг}} \right]^{-1}, \quad (4.5)$$

где L , G – массовые расходы воды и воздуха, кг/с ; $c_{pж}$, $c_{pг}$ – удельные теплоемкости воды и воздуха, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

С учетом термодинамических параметров влажного воздуха отношение $E_{ж}/E_{г}$ получено в работе [115, 132].

$$\frac{E_{г}}{E_{ж}} = \frac{L c_{pж} (T_{жн} - T_{мг}) + Q_{и}}{G (I_{к}^* - I_{н})}, \quad (4.5.1)$$

где $Q_{и}$ – тепловой поток с испарившейся водой, Вт; $Q_{и} = c_{pж} T_{жн} (C_{н}^* - C_{н})$ или с массообменной эффективностью $Q_{и} = G c_{pж} T_{жн} E_{ж} (C_{н}^* - C_{н})$.

Тепловая эффективность охлаждения воды $E_{ж}$ имеет вид (2.23).

Температура воды после охлаждения

$$T_{к} = T_{н} - E_{ж} (T_{н} - T_{мг}) \quad (4.6)$$

Считается, что если $\Delta T = T_{н} - T_{к} > 10^\circ\text{C}$, то градирня работает эффективно.

Однако часто $\Delta T < 10^\circ\text{C}$, особенно в летнее время.

В результате расчетов установлена высокая тепловая эффективность мини-градирни с рулонной насадкой [89] (4.6). Результаты расчетов гидравлических и тепломассообменных характеристик охлаждения воды при скорости воздуха $w_{\Gamma}=1,5\text{ м/с}$ приведены в таблице 4.1 [143].

Таблица 4.1. - Основные характеристики охлаждения воды в мини-градирне

Расчетные величины	Плотность орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$		
	20	40	60
$\Delta p_{\text{оп}}/\Delta p_{\text{сух}}$	1,45	2,13	3,1
$\xi_{\text{оп}}$	0,67	0,99	1,42
$\alpha_{\Gamma}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	37,8	44,9	52,7
$\beta_{\Gamma}, \text{м/с}$	0,0316	0,0374	0,0438
$E_{\Gamma}, \text{при } H=0,25\text{ м}$	0,92	0,96	0,97
$E_{\text{ж}}, \text{при } H=0,25\text{ м}$	0,47	0,48	0,45
$E_{\Gamma}, \text{при } H=0,5\text{ м}$	0,992	0,997	0,999
$E_{\text{ж}}, \text{при } H=0,5\text{ м}$	0,91	0,92	0,96

Из результатов расчетов следует, что при высоте слоя насадки $H \geq 0,5$ м тепловая эффективность охлаждения воды составляет более 90% и при $H = 1,0$ м достигает 99% (тепловая эффективность крупномасштабных градирен редко превышает 50% и в большинстве случаев находится в пределах 25...40%).

При расчете тепловой эффективности не учитывались возможные неравномерности распределения фаз, так как в мини градирне они незначительные. Высокая тепловая эффективность обеспечивается за счет большой удельной поверхности насадки и повышенного гидравлического сопротивления по сравнению с крупномасштабными градирнями. Так, при $w_{\Gamma}=1,5$ м/с и $q_{\text{ж}} = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$ перепад давления $\Delta P_{\text{оп}}/H = 63 \text{ Па/м}$, а при $40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$ – $\Delta P_{\text{оп}}/H = 133 \text{ Па/м}$. Для сравнения, сетчатые насадки из полиэтилена при $w_{\Gamma} = 20$ м/с и $q_{\text{ж}} = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$ характеризуются $\Delta p_{\text{оп}}/H \approx 10 \text{ Па/м}$ ($a_v=75\text{ м}^2/\text{м}^3$; $d_s=0,048$

м). Однако тепловая эффективность таких сетчатых насадок при указанном режиме не превышает 25%, а при повышении расхода воды значительно снижается. Учитывая, что недостаточное охлаждение оборотной воды может привести к нарушению технологического режима установки и всего производства, незначительное повышение энергозатрат на охлаждение воды оправдано. Так, например, на охлаждение воды при плотности орошения $40 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$ необходимая мощность для подачи воздуха в мини градирню диаметром 1,15 м составит 200 Вт, или 5 Вт на $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ воды (без учета местных сопротивлений).

4.2. Снижение энергозатрат на охлаждение воды с применением мини градирен

Охлаждение оборотной воды на ТЭС и различных промышленных предприятиях является важной задачей, от которой зависят как эффективность работы установок и оборудования, так и энергозатраты. При охлаждении больших объемов воды чаще всего применяются крупномасштабные градирни (диаметром более 20 метров) с пленочными блоками оросителей (регулярными насадками). Для снижения себестоимости блоков оросителей их изготавливают чаще всего из полимерных материалов (гофрированные трубы, сетчатые полиэтиленовые трубы и др.). Энергозатраты на охлаждение воды складывается из мощности на подачу воздуха в градирню и мощности на подачу воды на орошение блоков насадки. Причем в крупногабаритных градирнях форсунки размещаются на высоте 10 и более метров от уровня земли.

Запатентована конструкция пленочной мини градирни с расположением комбинированных насадок (рис. 4.1.) [146].

Конструкция относится к области промышленной теплоэнергетики и может быть использована для повышений эффективности процесса охлаждения воды на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и других промышленных предприятиях.

Научно-техническим результатом является увеличение эффективности процессов тепломассообмена в градирне вследствие применения регулярных и хаотичных насадок с шероховатой поверхностью «Инжехим» с удельной поверхностью $200-300 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Технический результат достигается тем, что в мини градирне на водосборном бассейне в нижней части установлен корпус с воздухоходными окнами, в корпусе расположены последовательно сверху вниз сетчатый каплеуловитель, коллектор для подачи воды, снабженный водоразбрызгивающими соплами, а также установленный наверху корпуса вентилятор; настоящая модель содержит слой хаотичных насадок «Инжехим» (IRG) и слой регулярных насадок. При этом высота слоя хаотичной насадки составляет $0,25$ высоты слоя регулярной насадки (рис. 4.1) [146].

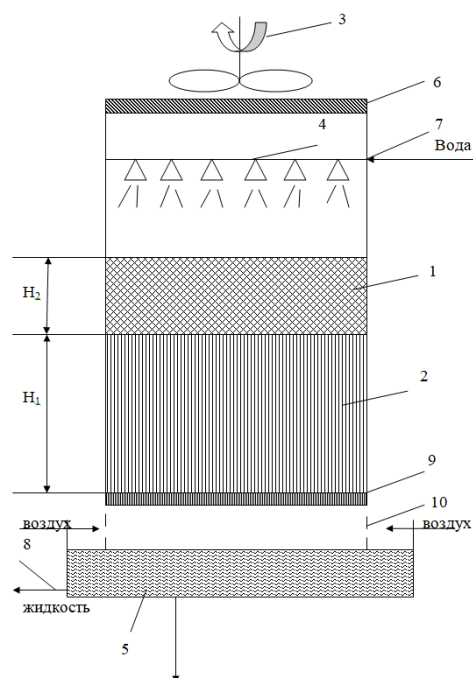


Рисунок 4.1. - Мини градирня с насадками

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 – воздуходувные окна.

Устройство представляет собой цилиндрический аппарат, заполненный хаотичными 1 и регулярными 2 насадками, причем высота хаотичной насадки

меньше и составляет 25% от регулярной. Имеется вентилятор 3, сопла 4 для равномерной подачи охлаждаемой воды, бассейн для сбора 5, сетчатый каплеуловитель 6, коллектор для подачи воды 7, коллектор для выхода охлажденной воды 8, опорную решетку 9 для насадки и воздухоудувные окна 10.

Отличием предполагаемой мини градирни с насадками является то, что в верхней части содержится слой хаотичной насадки 1, которая обеспечивает равномерность распределение воды на слой регулярной насадки 2, и тем самым повышается тепловая эффективность.

Устройство работает следующим образом. Сверху колонны, проходя через коллектор 7 для подачи воды через распределительное устройство в виде сопла 4 для подачи воды, поступает жидкость, 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 воздухоудувные окна 10. Взаимодействуя с жидкостью в противотоке, происходит процесс тепломассообмена охлаждения воды. Режим течения пленки жидкости волновой, а воздуха – турбулентный. Так как геометрические параметры элементов хаотичной насадки 1 превышают размеры (геометрические параметры) каналов регулярной 2, установка дополнительных опорных решеток между слоями насадок не является обязательной. Под регулярной насадкой 2 же опорная решетка 9 установлена. Охлажденная вода поступает в бассейн 5 для сбора воды, уже оттуда направляется на дальнейшие нужды предприятия.

Плотность орошения в такой мини градирне достигает $40 \text{ м}^3/\text{м}^2$ час, что в 3-4 раза выше крупногабаритных градирен. Отсюда и габариты будут в 3-4 раза меньше. В ходе теоретических исследований было установлено, что тепловой КПД предлагаемой мини градирни может достигать 96%.

Прототипом является градирня для обработки подземных вод с устойчивыми формами железа, которая содержит контактный резервуар с установленными над ним ограждающими конструкциями. В пределах ограждающих конструкций размещена насадка, выполненная из сетчатого

материала с развитой поверхностью, закрепленного в виде полотнищ на рамных конструкциях, установленных под углом 80 - 85°. Также градирня содержит вентилятор, систему подвода и диспергирования исходной и систему отбора обработанной воды [149].

Недостатком прототипа является неравномерность подачи исходной воды на слой насадок ввиду отсутствия выравнивающего распределительного устройства, а также большие габариты, что препятствует установке такой градирни в непосредственной близости от технологического оборудования.

В представленной выше конструкции мини градирни с насадками устранены недостатки прототипа.

4.3. Алгоритм расчета мини градирни

Для расчета тепловых характеристик мини градирни применялась математическая модель, разработанная во второй главе, а также модифицированный метод чисел единиц переноса с учетом обратного перемешивания потоков (раздел 2.3).

Получено выражение (2.39) для определения высоты блоков оросителей при заданном режиме охлаждения воды

$$H = \left(\frac{G}{\beta_x a_v S \psi_w} + b_{\Gamma} \frac{D_{\text{ПГ}}}{w_{\Gamma}} + b_{\text{Ж}} \frac{D_{\text{ПЖ}}}{u_{\text{Ж}}} \right) \frac{I_{\text{ГК}} - I_{\text{ГН}}}{\Delta I_{\text{ср}}}, \quad (4.7)$$

где b_{Γ} , $b_{\text{Ж}}$ - эмпирические коэффициенты; G - массовый расход воздуха, кг/с; β_x - средний коэффициент массоотдачи, кг/(м²с); w_{Γ} , $u_{\text{Ж}}$ - средние скорости воздуха и воды в блоках, м/с; a_v - удельная поверхность насадки, м²/м³; ψ_w - коэффициент смачиваемости поверхности; S - площадь поперечного сечения градирни, м²; $D_{\text{ПГ}}$, $D_{\text{ПЖ}}$ - коэффициенты обратного перемешивания воздуха и воды, м²/с; $I_{\text{ГК}}$, $I_{\text{ГН}}$ - конечная и начальная энтальпия воздуха, Дж/кг; $\Delta I_{\text{ср}}$ - средняя разность энтальпий, Дж/кг, вычисляется как средняя логарифмическая [119].

После идентификации параметров b_1 и b_2 получено выражение для расчета H в виде [97]

$$H = \left[\frac{G}{\beta_x a_v S \psi_w} + d_3 \left(1,4 Pe_{\text{ЭГ}}^{-1} + 1,4 Pe_{\text{ЭЖ}}^{-1} \right) \right] \frac{I_{\text{ГК}} - I_{\text{ГК}}}{\Delta I_{\text{ср}}}, \quad (4.8)$$

где $Pe_{\text{ЭГ}} = w_{\text{Г}} d_3 / D_{\text{ПГ}}$; $Pe_{\text{ЭЖ}} = u_{\text{Ж}} d_3 / D_{\text{ПЖ}}$ - числа Пекле по перемешиванию потоков, отнесенные к эквивалентному диаметру насадки $d_3 = 4\varepsilon_{\text{СВ}} / a_v$, $\varepsilon_{\text{СВ}}$ - удельный свободный объем, м³/м³; $\beta_x a_v \psi_w = \beta_{\text{вх}}$, кг/(м³с).

Число Пекле, отнесенное к высоте блоков, для стекающей пленки воды по регулярной насадке можно вычислить по эмпирическому выражению для трубчатой насадки [116]

$$Pe_{\text{Ж}} = \frac{u_{\text{Ж}} H}{D_{\text{ПЖ}}} = A Re_{\text{Ж}}^m Ga^{0,1} (H/\theta)^{0,68} \quad (4.9)$$

где $Re_{\text{Ж}} = 4q / (a_v \nu_{\text{Ж}})$; - число Рейнольдса; ρ - плотность орошения, м³/(м с); $Ga = g \chi^3 / \nu_{\text{Ж}}^2$ - критерий Галилея рассчитывается по капиллярной постоянной $\chi = \sqrt{\sigma / g \rho_{\text{Ж}}}$; σ - поверхностное натяжение, Н/м; $\theta = (\nu_{\text{Ж}}^2 / g)^{1/3}$ - приведенная толщина пленки, м; $\nu_{\text{Ж}}$ - коэффициент кинематической вязкости воды, м²/с.

Значения коэффициентов A и m в выражении (4.9) равны (таблица 4.2.)

Таблица 4.2. - Значения коэффициентов A и m

$Re_{\text{Ж}}$	A	m
50-340	0,0171	-0,36
340-1200	$3,88 \cdot 10^{-5}$	0,66

Из выражения (4.8) число Пекле, отнесенное к эквивалентному диаметру насадки равно $Pe_{\text{ЭГ}} = Pe_{\text{Ж}} d_3 / H$.

В газовой фазе для регулярных насадок можно использовать приближенное выражение, полученное с применением модели Тейлора для турбулентного режима [109]

$$Pe_{\text{эГ}} = \frac{w_{\Gamma} d_{\text{э}}}{D_{\text{ПГ}}} = \frac{0,43}{\sqrt{\xi_{\text{ор}}}}, \quad (4.10)$$

где $\xi_{\text{ор}}$ коэффициент гидравлического сопротивления орошаемой насадки.

В известных методах насадочных абсорберов используют фиктивное число единиц переноса N_{Γ}^{\cdot} , которое косвенно учитывает обратное перемешивание потоков при применении выражения модели идеального вытеснения по газовой фазе [116]. Тогда эффективность имеет вид:

$$E_{\Gamma} = 1 - \exp(-N_{\Gamma}^{\cdot}). \quad (4.11)$$

Значение фиктивного (кажущегося) числа единиц переноса запишем из выражения (4.7)

$$N_{\Gamma}^{\cdot} = H \left[\frac{G}{\beta_{\text{X}} a_{\text{V}} S \psi_{\text{W}}} + 1,4 d_{\text{э}} \left(Pe_{\text{эГ}}^{-1} + Pe_{\text{эЖ}}^{-1} \right) \right]^{-1}. \quad (4.12)$$

Тогда тепловая эффективность (4.10) получит вид:

$$E_{\Gamma} = 1 - \exp \left\{ -H \left[\frac{G}{\beta_{\text{X}} a_{\text{V}} S \psi_{\text{W}}} + 1,4 d_{\text{э}} \left(Pe_{\text{эГ}}^{-1} + Pe_{\text{эЖ}}^{-1} \right) \right]^{-1} \right\}. \quad (4.13)$$

Или при $w_{\Gamma} = G / (\rho_{\Gamma} S_{\text{к}})$ имеем

$$E_{\Gamma} = 1 - \exp \left\{ -H \left[\frac{w_{\Gamma} \rho_{\Gamma}}{\beta_{\text{X}} a_{\text{V}} \psi_{\text{W}}} + 1,4 d_{\text{э}} \left(Pe_{\text{эГ}}^{-1} + Pe_{\text{эЖ}}^{-1} \right) \right]^{-1} \right\}. \quad (4.14)$$

Таким образом, вычисляя тепловую эффективность по газовой фазе (4.14), далее можно определить по выражению (4.5.1) эффективность охлаждения воды $E_{\text{ж}}$ и температуру воды на входе и выходе и, изменяя конструктивные характеристики градирни, выбрать такие, которые обеспечивают требуемую температуру. Расчетные и экспериментальные данные приведены на рис. 4.2.

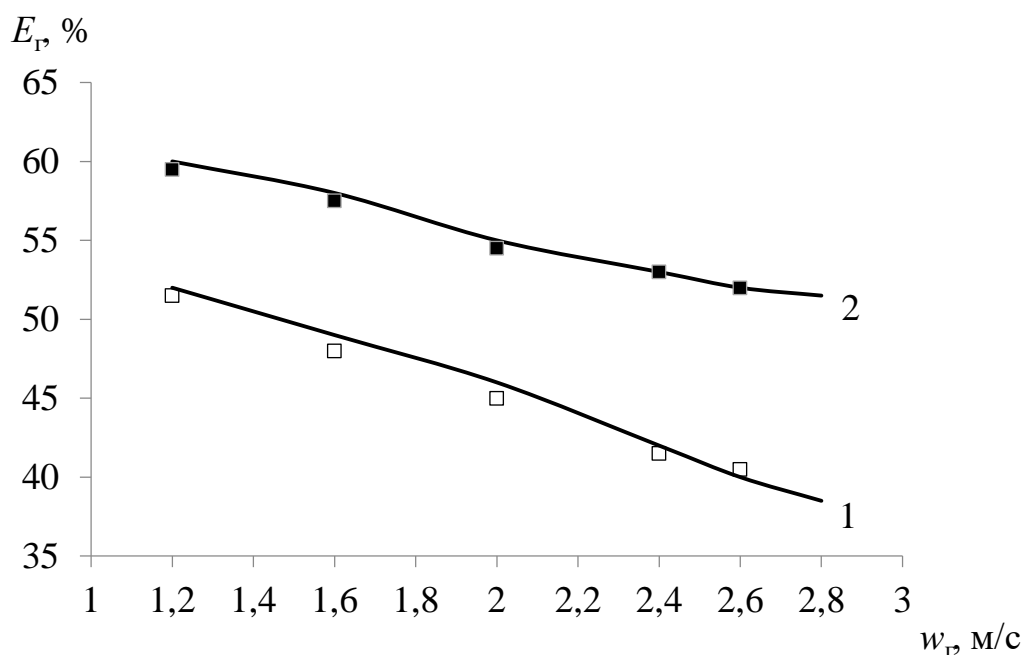


Рисунок 4.2. – Тепловая эффективность в газовой фазе комбинированной насадки из шероховатых труб ($H=1,0$ м) и «Инжехим – 2012» ($H = 0,2$ м). 1 – $q_{ж} = 8,8$ м³/(м²час); 2 – $q_{ж} = 19,4$ м³/(м²час). Сплошные линии – расчет по выражению (4.13); точки – экспериментальные данные.

4.4. Результаты расчетов охлаждения воды в мини градирне

Рассмотрена замена крупномасштабной градирни диаметром 20 метров (СК-400), на несколько мини градирен с высокими удельными нагрузками. Требуемая тепловая эффективность по жидкой фазе задана $E_{ж} = 0,43$, исходя из данных эксплуатации промышленной градирни СК-400 на АО «Казаньоргсинтез». Расход воды $V_{ж} = 2500$ м³/ч, скорость воздуха $w_r = 1,5$ м/с, начальная температура воды $T_{жн} = 38,4$ °С требуемая конечная $T_{жк} = 22,3$ °С температура воздуха $T_{гн} = 25,8$ °С, энтальпия воздуха $T_{гн} = 25,8$ °С, температура мокрого термометра $I_{н} = 47,2$ кДж/кг, влагосодержание воздуха на входе $\varphi = 36\%$.

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

Расчет мини градирни выполнен с сегментной регулярной насадкой «Инжехим» ($a_v=180$ м²/м³) и регулярной рулонной насадкой с шероховатой

поверхности «Инжехим» [117] » ($a_v=180 \text{ м}^2/\text{м}^3$). Принята скорость воздуха $w_r=2,6 \text{ м/с}$ и плотность орошения $q_{ж}=22 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$. При таком режиме имеем $\beta_x=0,058 \text{ кг/м}^2\text{с}$, число ячеек $n=8$ – для сегментной регулярной насадки. При плотности орошения $q_{ж}=22 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$., коэффициент смачиваемости поверхности насадки $\psi_w \approx 0,9$.

Суммарная площадь поперечного сечения мини градирен $S=V_{ж}/q=113,6 \text{ м}^2$. Массовый расход воздуха $G=2,6 \cdot S \rho_r = 348,5 \text{ кг/с}$. Энтальпия воздуха на выходе при потоке тепла $Q=V_{ж} \rho_{ж} c_{рж} (T_{нж} - T_{кж}) = G(I_k - I_n)$ находится из уравнения теплового баланса получено: $I_k = 104581,7 \text{ Дж/кг}$.

Высота блока насадки из сегментной регулярной по формуле (2.7) $H = 0,74 \text{ м}$; для регулярной рулонной с шероховатой поверхностью $H = 0,85 \text{ м}$; для полиэтиленовой сетчатой насадки $H = 1,65 \text{ м}$, $a_v \approx 140 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Учитывая приближенный характер расчета коэффициента смачиваемости поверхности насадок примем для первой насадки $H = 0,9 \text{ м}$, для второй $H = 1,0 \text{ м}$ (с запасом 20%), для полиэтиленовой $H = 2,0 \text{ м}$.

Перепад давления воздуха для первой насадки $\Delta P_{op} = 105 \text{ Па}$, а для второй $\Delta P_{op} = 100 \text{ Па}$ для полиэтиленовой сетчатой насадки $\Delta P_{op} = 88 \text{ Па}$.

Исходя из сделанных расчетов, целесообразным является применение рулонной гофрированной насадки с шероховатой поверхностью [143].

Число необходимых мини градирен для рассмотренных выше условий составит $113,6/S_{гр}$, где $S_{гр}$ – площадь поперечного сечения одной мини градирни. Например, при $S_{гр}=36 \text{ м}^2$ получаем 3 мини градирни.

Мощность на подачу воздуха в мини градирню $N_r = \Delta P V_r = 100 \cdot 2,6 \cdot 113,6 = 29536 \text{ Вт} = 29,5 \text{ кВт}$ Мощность на подачу воздуха в крупномасштабную градирню составит: $N_r = 8,8 \cdot 1,5 \cdot 314 = 41,5 \text{ кВт}$.

Таким образом, получили, что энергозатраты на подачу воздуха с применением мини градирен снижаются на 12 кВт или на 40%.

В крупномасштабной градирне механическая мощность на охлаждение 1т/час воды составляет 0,017 кВт/т, а в мини градирнях 0,0115 кВт/т.

В градирне СК–400 высота от уровня земли до форсунок составляет около 8 метров, а высота мини градирни в два раза меньше. Даже без учета местных сопротивлений гидравлическое сопротивление приближенно запишем $\Delta P_{\text{ж}} = \rho_{\text{ж}} g H_{\text{ж}}$. Для крупномасштабной градирни $\Delta P_{\text{ж}} = 78$ кПа, а для мини градирни $\Delta P_{\text{ж}} = 39$ кПа. Соответственно мощность на подачу воды составит значения $N_{\text{ж}} = 54,2$ кВт и $N_{\text{ж}} = 27,1$ кВт.

Суммарная мощность на охлаждение воды (без учета транспортировки по трубам до места расположения градирни): $N = N_{\text{ж}} + N_{\text{г}}$.

- для крупномасштабной градирни $N = 95,7$ кВт;

- для мини градирен $N = 56,6$ кВт

Таким образом, 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 м³/час, - экономический эффект весьма существенный.

В таблице 4.3. даны сводные гидравлические и тепловые характеристики охлаждения воды в мини градирне с регулярной рулонной насадкой с шероховатой поверхностью «Инжехим».

Таблица 4.3. - Сравнительные характеристики крупномасштабной градирни СК–400 и мини градирен при охлаждении 2500 м³/час воды с 33°С до 25 °С.

Параметры	СК–400	Мини градирня (с рулонной гофрированной насадкой)
Число градирен	1	3
Плотность орошения, q , м ³ /(м ² час)	7,96	22,0
Скорость воздуха, w_r , м/с	1,5	2,6*
Расход воздуха, V_r , кг/с	555,8	348,5
Тепловая эффективность, $E_{ж}$, %	43	43*
Площадь поперечного сечения, S , м ²	314	113,6
Удельная поверхность насадки, a_v , м ² /м ³	140	180
Высота насадки, H , м	1,5	1,0*
Объем насадки, м ³	471	113,6
Перепад давления воздуха, ΔP , Па	88	100
Мощность на подачу воздуха, N , кВт	41,5	29,6
Суммарная мощность на охлаждение воды, кВт	95,7	56,6

* - для каждой градирни

Расчеты показывают, что при увеличении плотности орошения мини градирен с 22 до 30 м³/(м²час) требуемая площадь градирен составит 83,3 м², а требуемая скорость воздуха возрастает до $w_r = 3,6$ м/с. Тогда перепад давления орошаемого слоя равен $\Delta P_{op}/H = 200$ Па и мощность для подачи воздуха вырастет в два раза, что является нецелесообразным.

На рисунке 4.3 дана зависимость мощности N_r от плотности орошения мини градирни [143].

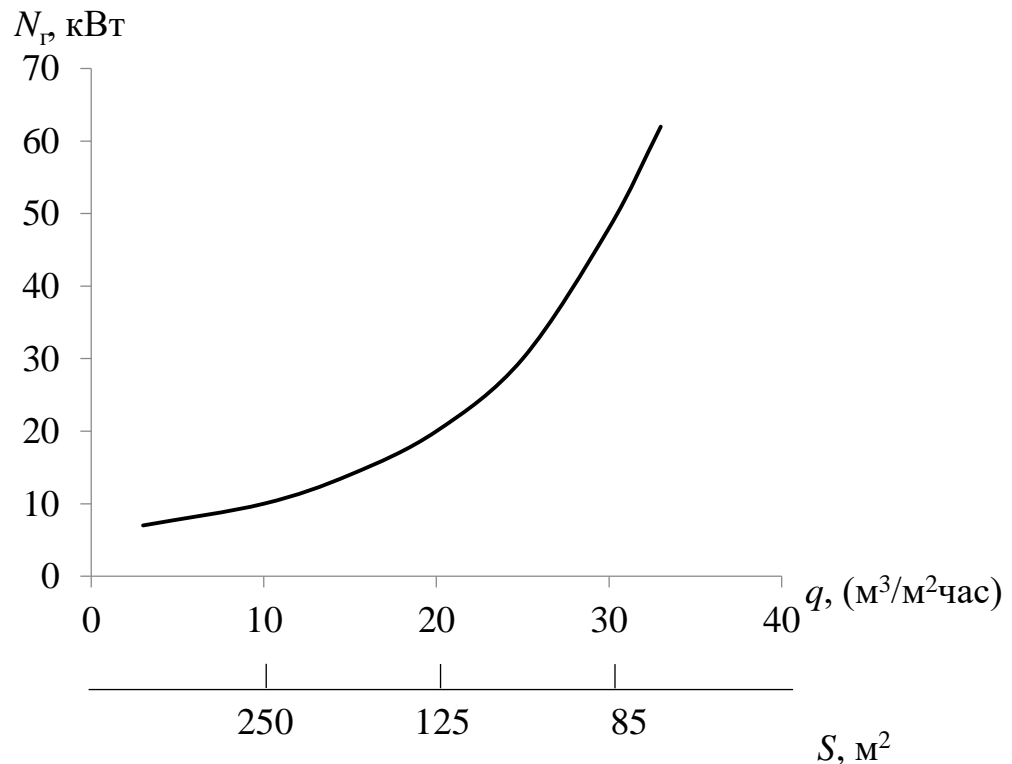


Рисунок 4.3. Зависимость мощности на подачу воздуха в мини градирни с регулярной рулонной насадкой от плотности орошения при охлаждении $2500\text{м}^3/\text{час}$ воды с 33°C до 25°C . По нижней оси - площадь сечения градирни.

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

4.5. Энергетические характеристики пленочных градирен

Важными характеристиками работы градирен являются тепловая эффективность и энергозатраты на подачу воды и воздуха.

Ниже рассмотрен один из вариантов расчета этих характеристик и сделаны выводы о конструкциях блоков оросителей [150].

4.5.1. Теплогидравлическая эффективность

Важной характеристикой работы градирни является тепловая эффективность охлаждения воды (2.23).

По газовой фазе (воздуху) тепловую эффективность представим в форме

$$E_{\Gamma} = \frac{I_{\text{к}} - I_{\text{н}}}{I_{\text{тжн}} - I_{\text{н}}}, \quad (4.15)$$

где $I_{\text{н}}$, $I_{\text{к}}$ – начальная и конечная энтальпии влажного воздуха, Дж/кг; $I_{\text{тжн}}$ – энтальпии воздуха на выходе градирни при начальной температуре жидкости.

Между эффективностями по жидкой и газовой фазам известна приближенная зависимость (4.5.1).

Из выражения (4.5.1) разность температур

$$\Delta T = T_{\text{н}} - T_{\text{к}} = E_{\text{ж}}(T_{\text{н}} - T_{\text{мт}}). \quad (4.16)$$

Очевидно, что чем больше значение ΔT , тем эффективнее работает градирня. В предельном случае при $E_{\text{ж}}=1$, $\Delta T = T_{\text{н}} - T_{\text{мт}}$. Однако на практике всегда $E_{\text{ж}} < 1$ и обычно составляет $E_{\text{ж}}=0,2 \div 0,5$ (20-50%).

Кроме тепловой эффективности важное значение имеют мощности, затрачиваемые на подачу жидкости и газа. Рассмотрим вариант, когда вода подается на охлаждение с постоянным расходом и тогда мощность $N_{\text{ж}}$ (Вт) не зависит от типа контактных устройств в градирне, где происходит охлаждение. Мощность на подачу воздуха записывается в виде (Вт)

$$N_{\Gamma} = \Delta P_{\Gamma} G / \rho_{\Gamma}, \quad (4.17)$$

где ρ_{Γ} – средняя плотность воздуха, кг/м³; ΔP_{Γ} – перепад давления воздуха в градирне, Па.

Значение ΔP_{Γ} зависит от гидравлического сопротивления контактных устройств (блоков оросителей) в нижней части и гидравлического сопротивления верхней части градирни, где происходит взаимодействие воздуха с водой в виде капель и струй. Известно, что значение ΔP_{Γ} в нижней части значительно больше, чем в верхней. Кроме этого, при выборе типа контактных устройств необходим расчет именно блоков оросителей.

Запишем отношение

$$E = \frac{\Delta T}{N_{\Gamma}} = \frac{E_{\text{ж}}(T_{\text{н}} - T_{\text{мт}})\rho_{\Gamma}}{\Delta P_{\Gamma} G}. \quad (4.18)$$

Очевидно, что чем больше значение $E_{\text{ж}}$, тем выше теплогидравлическая эффективность градирни. Основной задачей в такой постановке является определение тепловой эффективности $E_{\text{ж}}$ и перепада давления ΔP_{Γ} . Выражение (2.16) содержит как кинетические, так и термодинамические параметры работы градирни. Если стоит задача сравнительной теплогидравлической эффективности различных конструкций контактных устройств в блоках оросителей при одинаковом расходе воздуха и температурах, то можно записать:

$$E' = E_{\text{ж}} / \Delta P_{\Gamma}. \quad (4.19)$$

Следует отметить, что аналогичное выражение получено и для аппаратов газоочистки от аэрозолей [113, 130].

Перепад давления в блоках оросителей обычно находится экспериментально и обобщается с применением зависимости Дарси – Вейсбаха.

$$\Delta P_{\Gamma} = \xi \frac{H}{d_{\text{э}}} \frac{\rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}{2}, \quad (4.20)$$

где H – высота блока насадок, м; $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр насадки, м; w_{Γ} – средняя скорость воздуха в блоках, м/с; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления орошаемой насадки (глава 3).

4.5.2. Конструктивные и гидравлические характеристики насадок

Ниже представлены характеристики насадок, которые использовались в расчетах.

Рассмотрим несколько типов регулярных насадок [53, 119]:

1. Регулярная металлическая насадка Инжехим (IRG) из гофрированных листов с перекрестным расположением гофров и шероховатой поверхностью.

Удельная поверхность $a_v = 160 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем $\varepsilon_{св} \approx 0,98$, $d_3 = 0,0245$ м. Коэффициент гидравлического сопротивления [116, 117]

$$\xi = 3,18 Re_3^{-0,12} \quad (4.21)$$

2. Регулярная рулонная гофрированная насадка Инжехим с шероховатой поверхностью из металлической ленты. Удельная поверхность $a_v = 240 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем $\varepsilon_{св} \approx 0,9$, $d_3 = 0,015$ м. Коэффициент гидравлического сопротивления [53]

$$\xi = 3,89 Re_3^{-0,294} \quad (4.22)$$

3. Керамические кольца Рашига диаметром 100 мм, удельная поверхность $a_v \approx 60 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем $\varepsilon_{св} \approx 0,98$, $d_3 = 0,065$ м. Коэффициент гидравлического сопротивления

$$\xi = 9,2 Re_3^{-0,375} \quad (4.23)$$

4. Деревянная хордовая насадка 10×100 мм, удельная поверхность $a_v = 65 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем $\varepsilon_{св} = 0,68$, $d_3 = 0,042$ м. Коэффициент гидравлического сопротивления

$$\xi = 6,64 Re_3^{-0,375} \quad (4.24)$$

4.6. Результаты расчетов градирен с различными насадками

Выполнены расчеты градири с рассмотренными типами контактных устройств. За основы взяты данные работы градири 781 на АО «Казаньоргсинтез», где в качестве блоков оросителя используются сетчатые трубки из полиэтилена диаметром 50 мм. В таблице 4.3. представлены данные и работы такой градири в различное время года. Как видно, эффективность охлаждения воды невысокая и составляет 0,19 – 0,23 (19 - 23%).

Таблица 4.3. - Данные градирни 781 с сетчатой насадкой

Дата	$T_{\text{жн}}$ °С ВОДЫ	$T_{\text{жк}}$ °С ВОДЫ	$T_{\text{Г}}$ °С воздуха	$T_{\text{мтн.}}$ °С	Относ. влажн. воздуха, %	КПД пром %,	КПД расч, %	КПД после модер расч, %
2-10.01.03	22	17	- 20	-	70-75	23	27	31
2-10.04.03	26	19	5	2	78-79	22	25	29
2-10.07.03	33	29	28	18	60-70	19	22	25
2-10.09.03	28	22	15	7	80-85	21	24	27

В таблице 4.4. показаны результаты расчетов по вышеприведенным выражениям для данных насадок при $w_{\text{Г}} = 0,5$ м/с и $H = 1$ м; плотность орошения $7 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{час})$.

Таблица 4.4. - Результаты расчетов

№	$Re_{\text{Г}}$	ξ	Pe	$E_{\text{Г}}$	$E_{\text{ж}}$	$E_{\text{ж}}/\Delta P$
1	817	1,42	14,7	0,994	0,92	0,114
2	500	0,63	38,7	0,99	0,96	0,157
3	2167	0,52	9,1	0,6	0,372	0,31
4	1400	0,43	15,6	0,67	0,373	0,24

№ - номер насадок (стр. 135)

Из расчетов следует, что регулярные насадки «Инжехим» обеспечивают высокие показатели по тепловой эффективности, однако это достигается повышением перепада давления. Энергетический коэффициент примерно в два раза меньше чем традиционных насадок. Однако недоохлаждение воды в градирне с насадками №3 и 4 может привести к нарушению технологического режима на химическом предприятии и потере товарного продукта или к другим негативным последствиям.

Так, например, при $T_{\text{н}} = 33^\circ\text{С}$ и температуре мокрого термометра $T_{\text{мт}} = 18^\circ\text{С}$ значение ΔT с насадками №1 и №2 составляет $\Delta T = 14,8^\circ\text{С}$, а с насадками №3 и

№4 всего $\Delta T = 5,6^{\circ}\text{C}$. Для повышения значения ΔT (и $E_{\text{ж}}$) в градирне с насадками №3 и №4 необходимо увеличить высоту слоя с одного метра до 5 метров. Тогда обеспечивается $\Delta T = 14,8^{\circ}\text{C}$, однако и перепад давления увеличивается в 5 раз и достигает значения близкого к ΔP для насадок №1 и №2. Таким образом, применение регулярных насадок «Инжехим» (№1 и №2) обеспечивает небольшие габариты градирни и высокую эффективность.

Следует отметить, что регулярные и нерегулярные насадки «Инжехим» внедрены более чем в ста тепломассообменных колоннах, газосепараторах, отстойниках и статических смесителях [108, 130, 151, 152, 153, 154] и обеспечивают высокую эффективность проводимых процессов.

Выводы

В данной главе показана возможность применения метода единиц переноса с учетом обратного перемешивания потоков для определения тепловой эффективности охлаждения воды в противоточной пленочной градирне.

На основе расчетов по математической модели показано научно-техническое решение замены градирен промышленных предприятий на несколько мини градирен с энергосберегающим эффектом.

Рассмотренная конструкция регулярной насадки позволяет обеспечить высокую эффективность охлаждения оборотной воды и может применяться в мини градирнях. Окончательный выбор режимных и конструктивных характеристик мини градирни необходимо выполнять после проведения технико-экономического анализа.

По данной главе были опубликованы 2 научных статьи ВАК, 3 статьи РИНЦ, 2 – Scopus. Результаты обсуждались на Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения – 2021» "Энергетика и цифровая трансформация", Международной научно-практической конференции "Энергетические характеристики пленочных градирен. Результаты современных научных исследования и разработок" - 2017г, Всероссийской научно-

практической конференции «энергетика и энергосбережение: теория и практика» - 2021г. Имеется патент Мини градирня с насадками RU 175714 U1.

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 тепломассообмена для блока 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 выполнено разработана методика 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 м³/(м²час)) 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 м²/м³. 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 50x50 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 с шероховатой и гофрированной поверхностью ($a_v=250 \text{ м}^2/\text{м}^3$), в верхней части хаотичная «Инжехим» ($a_v=267 \text{ м}^2/\text{м}^3$). 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 (акты о внедрении результатов - Приложение 3) и ООО «ИВЦ «Инжехим».

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.

Библиографический список

1. Повышение эффективности тепломассообменных процессов в малогабаритных аппаратах охлаждения оборотной воды / К. Е. Бондарь, С. П. Иванов, Д. Ф. Сулейманов, Р. Р. Варисова // *Фундаментальные исследования*. – 2017. – № 9-1. – С. 25-29. – EDN ZHVLRX.
2. Власова Е. Р. Системы охлаждения и технического водоснабжения на ТЭЦ / Е. Р. Власова, Н. В. Комарова, Е. О. Реховская. — Текст : непосредственный // *Молодой ученый*. — 2016. — № 24 (128). — С. 135-136
3. Кучеренко, Д.И. *Оборотное водоснабжение* / Д.И. Кучеренко, В.А. Гладков. – М.: Стройиздат, 1980 – 168 с.
4. Гончаров В.В. Новые технические решения башенных и вентиляторных градирен / В.В. Гончаров // *Химическая техника*. – 2006 – № 6 – С.15–18.
5. Джурицкий М.Б. Основные тенденции и технический уровень строительства градирни / М.Б. Джурицкий, Н.В. Костиков // *Энергетическое строительство за рубежом*. – 1984 – № 2 – С. 10-12.
6. Зиганшин К.Г. Высокоэффективные контактные устройства реализации массообменных процессов / К.Г. Зиганшин, М.Н. Осинцев // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2003 – № 12
7. Федяев В.Л. Совершенствование испарительных градирен систем оборотного водоснабжения промышленных предприятий / В.Л. Федяев, В.И. Богаткин, Е.М. Власов // *Энергетика Татарстана*. – 2011 – № 2 – С. 44–47.
8. Пономаренко В.С. *Градирни промышленных предприятий* / В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев. – М.: Энергоатомиздат, 1998 – 376 с.
9. Пушнов А.С. Методы интенсификации процесса тепло- и массообмена в колонных аппаратах с контактными устройствами / А.С. Пушнов, А.С. Соколов, Бутрин // *Известия Московского государственного университета МАМИ*. – 2013 – Т.4. – № 1 (15). – С. 237–242.

10. Сосновский С.К. Пути повышения эффективности вентиляторных и башенных градирен / С.К. Сосновский, В.П. Кравченко // Холодильная техника и технология. – 2013 – № 4 – С. 51–60.

11 Kuritsyn V.A. Optimization of circulation water cooling process in forced-draft / V.A. Kuritsyn, D.V. Arapov, R.L. Goril'chenko // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2012 – Vol. 48 – No 2 – P. 97-108.

12. Особенности конструкции градирни росинка: [сайт]. – Москва – URL: <https://tecopro.ru/> (дата обращения: 23.08.2023).

13. Иванов С.П. Совершенствование тепломассообменных процессов в водооборотных циклах промышленных предприятий: специальность 05.17.08 «Процессы и аппараты химических технологий»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Иванов Сергей Петрович; ФГБОУ. – 2012.

14. Испарительные вентиляторные градирни ЕВРОМАШ: [сайт]. Москва – <http://www.evromash.ru/catalog/venti/vg/evromash/> (дата обращения: 23.08.2023).

15. Градирни малогабаритные серии ГМВ: [сайт]. Бровары – URL: <http://gradirni.com.ua/ru/glavnaja/lending-2017/gmv-mg-rus.html/> (дата обращения: 23.08.2023).

16. Вентиляторные градирни ГРД: [сайт]. Люберцы – URL: http://armavent.ru/gradirni_ventilyatornye_grd/ (дата обращения: 23.08.2023).

17. Арефьев, Ю.И. Сетчатые оросители из пластмасс / Ю.И. Арефьев, Л.П. Беззатеева // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004 – № 6 – С. 34–38.

18. Беренгартен М.Г. Эффективные конструкции структурированных насадок для процессов тепломасообмена / М.Г. Беренгартен, Г.Б. Дмитриева и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005 – № 8 – С. 15–17.

19. Иванов С.П. Сетчатая оболочка из полимерных материалов и композиций на их основе / С.П. Иванов, Е.В. Боев // Газовая промышленность. – 2007 – № 9 – С. 91–92.

20. Иванов С.П. Полимерный капельно - пленочный ороситель градирни / С.П. Иванов, Е.В. Боев, В.Г. Афанасенко, А.В. Боев // IV Международная научно-

практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007 – С. 303–304.

21. Иванов С.П. Разработка конструкции полимерного капельно – пленочного оросителя градирен / С.П. Иванов, Е.В. Боев, А.В. Боев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007 – № 10 – С. 5–6.

22. Патент № 2001375 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (1990/01). Лист оросителя градирни: № 914951331: заявл. 07.06.1991: опубл. 15.10.1999 / Алексеев В.В., Арефьев Ю.И., Балашов Е.В. – 3 с.: ил.

23. Патент № 2145699 Российская Федерация, МПК F28F25/00 (2000/01). Ороситель противоточной градирни: № 99113822/06: заявл. 06.07.1999: опубл. 20.02.2000 / Генкин В.С., Лапига Е.Я., Мирзабекян Г.З. и др.; заявитель ООО "НПФ ЭИТЭК". – 4 с.: ил.

24. Патент № 2187059 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2000/01). Ороситель градирни: № 2000127268/06: заявл. 01.11.2000: опубл. 10.08.2002 / Обухов С.В. – 3 с.: ил.

25. Патент № 2192305 Российская Федерация, МПК B01J19/32 (2000/01). Регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов: № 2001106477/12: заявл. 13.03.2001: опубл. 10.11.2002 / Дудов А.Н., Кульков А.Н., Ставицкий В.А.; заявитель Дочернее ОАО "Центральное конструкторское бюро нефтеаппаратуры" ОАО "Газпром". – 5 с.: ил.

26. Патент № 2197694 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2000/01). Ороситель градирни: № 2001108886/06: заявл. 05.04.2001: опубл. 27.01.2003 / Давлетшин Ф.М., Давлетшин Ф.Ф. – 4 с.: ил.

27. Патент № 2201571 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2000/01). Ороситель градирни: № 2001117587/06: заявл. 28.06.2001: опубл. 27.03.2003 / Обухов С.В. – 3 с.: ил.

28. Патент № 2211424 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2000/01). Ороситель градирни: № 2001127482/06: заявл. 09.10.2001: опубл. 27.08.2003 / Стороженко В.Н., Измайлов С.П., Иванов С.П. – 4 с.: ил.

29. Патент № 2224968 Российская Федерация, МПК F28F25/00 (2000/01).
Ороситель градирни: № 2002108381/06: заявл. 04.04.2002: опубл. 27.02.2004 /
Богомоллов В.А., Федосеев В.Ф., Абрамова Г.Г. – 3 с.: ил.

30. Патент № 2243468 Российская Федерация, МПК F28F25/00 (2000/01).
Ороситель градирни: № 2003112752/06: заявл. 29.04.2003: опубл. 27.12.2004 /
Стороженко В.Н., Измайлов С.П., Герасимов В.В. и др. – 4 с.: ил.

31. Патент № 2300067 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01).
Блок оросителя градирни: № 2006106086/06: заявл. 28.02.2006: опубл. 27.05.2007 /
Давлетшин Ф.М. – 5 с.: ил.

32. Патент № 2306519 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01).
Ороситель градирни: № 2006106088/06: заявл. 28.03.2006: опубл. 20.09.2007 /
Давлетшин Ф.М. – 4 с.: ил.

33. Патент № 2309356 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01).
Блок оросителя градирни: № 2006117205/06: заявл. 19.05.2006: опубл. 27.10.2007 /
Давлетшин Ф.М. – 7 с.: ил.

34. Патент № 2325605 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01).
Ороситель градирен: № 2006136336/06: заявл. 13.10.2006: опубл. 27.05.2008 /
Иванов С.П., Боев Е.В., Стороженко В.Н. и др. – 3 с.: ил.

35. Патент № 2359195 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01).
Блок оросителя градирни: № 2007145101/06: заявл. 06.12.2007: опубл. 20.06.2009 /
Давлетшин Ф.М. – 6 с.: ил.

36. Патент № 2412419 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01).
Блок оросителя градирни: № 2009101518/06: заявл. 19.01.2009: опубл. 20.02.2011 /
Волков В.В., Панов А.К., Шмонин Е.И., Селезнев П.Е. – 4 с.: ил.

37. Патент № 2414662 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01).
Ороситель градирни: № 2009107458/06: заявл. 27.02.2009: опубл. 20.03.2011 / Боев
Е.В., Иванов С.П., Афанасенко В.Г., Николаев Е.А. – 4 с.: ил.

38. Патент № 2445567 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01).
Ороситель градирни (варианты): № 2010118394/06: заявл. 06.05.2010: опубл.

20.03.2012 / Богомолов В.А., Мельников В.Д., Абрамова Г.Г., Носков С.А. – 5 с.: ил.

39. Патент № 2509282 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01). Труба полимерная оросителя градирни: № 2012118067/06: заявл. 03.05.2012: опубл. 10.03.2014 / Давлетшин Ф.М. – 5 с.: ил.

40. Патент № 2418256 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01). Ороситель градирни: № 2010101689/06: заявл. 21.01.2010: опубл. 10.05.2011 / Кочетов О.С. – 2 с.: ил.

41. Патент № 2490578 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01). Ороситель градирни (варианты): № 2011145529/06: заявл. 10.11.2011: опубл. 20.08.2013 / Кочетов О.С., Стареева М.О. – 3 с.: ил.

42. Патент № 2494331 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01). Ороситель градирни Кочетова: № 2011145531/06: заявл. 10.11.2011: опубл. 27.09.2013 / Кочетов О.С., Стареева М.О. – 3 с.: ил.

43. Патент № 2535450 Российская Федерация, МПК F28C1/00 (2006/01). Система Кочетова оборотного водоснабжения: № 2013149112/06: заявл. 06.11.2013: опубл. 10.12.2014 / Кочетов О.С., Стареева М.О., Стареева М.М. – 6 с.: ил.

44. Патент № 2586037 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01). Регулярная насадка для осуществления процессов тепло- и массообмена: № 2015121840/06: заявл. 09.06.2015: опубл. 10.06.2016 / Баранова Е.Ю., Пушнов А.С., Коровин П.И. и др.; заявитель ФГБОУ ВПО МАМИ. – 9 с.: ил.

45. Патент № 2635726 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01). Блок оросителя градирни: № 2016107660: заявл. 03.03.2016: опубл. 07.09.2017 / Давлетшин Ф.М. – 7 с.: ил.

46. Патент № 2661435 Российская Федерация, МПК F28F25/08 (2006/01). Ороситель градирни: № 2017124061: заявл. 07.07.2017: опубл. 16.07.2018 / Кочетов О.С. – 4 с.: ил.

47. Патент № 2677433 Российская Федерация, МПК F28F25/00 (2006/01). Блок оросителя градирни: № 2017141104: заявл. 27.11.2017: опубл. 16.01.2019 / Давлетшин Ф.М. – 10 с.: ил.

48. Бондарь К. Е. Конструкция оросителя градирни из полимерных материалов / К. Е. Бондарь // Актуальные вопросы современных научных исследований : Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции, Минск, 07 февраля 2019 года / под общей редакцией А.И. Вострецова. – Минск: Научно-издательский центр "Мир науки" (ИП Вострецов Александр Ильич), 2019. – С. 19-23. – EDN YXOGAP.

49. Загидуллин А. М. Ороситель градирен из полимерных перфорированных элементов / А. М. Загидуллин, П. П. Иванов // Приоритетные направления развития науки и образования. – 2015. – № 2(5). – С. 290-291. – EDN UCVVRX.

50. Патент № 2414663 С2 Российская Федерация, МПК F28F 25/08. полимерный капельно-пленочный ороситель градирен : № 2009107460/06 : заявл. 27.02.2009 : опубл. 20.03.2011 / Е. В. Боев, С. П. Иванов, В. Г. Афанасенко, Е. А. Николаев ; заявитель ГОУ ВПО "Уфимский государственный нефтяной технический университет". – EDN FVLDEN.

51. Патент № 2493528 С2 Российская Федерация, МПК F28F 25/08, B01J 19/32. полимерная труба оросителя градирни : № 2011133275/06 : заявл. 09.08.2011 : опубл. 20.09.2013 / Ф. М. Давлетшин. – EDN QRZLLR.

52. Cioncolini A. Pressure drop prediction in annular two-phase flow in macroscale tubes and channels / A. Cioncolini, J.R. Thome // International Journal of Multiphase Flow. – 2017 – No. 89 – P. 321–330. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.11.003

53. Interfacial friction in upward annular gas–liquid two-phase flow in pipes / A.M. Aliyu, Y.D. Baba, L. Lao et al. // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2017 – No. 84 – P. 90–109. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.02.006

54. Film thickness of vertical upward co-current adiabatic flow in pipes / P. Ju, C.S. Brooks, M. Ishii et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015 – No. 89 – P. 985–995. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.002

55. Prediction of interfacial shear stress of vertical upward adiabatic annular flow in pipes / P. Ju, Y. Liu, C.S. Brooks, M. Ishii // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019 – No. 133 – P. 500–509. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.057

56. Fossa, M. A simple model to evaluate direct contact heat transfer and flow characteristics in annular two- phase flow / M. Fossa // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 1995 – No. 16 (4). – P. 272–279. DOI: 10.1016/0142-727x(95)00027-n

57. Suzuki, K. Heat transfer and flow characteristics of two-phase two-component annular flow / K. Suzuki, Y. Hagiwara, T. Sato // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1983 – No. 26 (4). – P. 597–605. DOI: 10.1016/0017-9310(83)90010-8

58. Measurement of liquid film thickness in micro tube annular flow / Y. Han, H. Kanno, Y.-J. Ahn, N. Shikazono // International Journal of Multiphase Flow. – 2015 – No. 73 – P. 264–274. DOI: 10.1115/ihtc14-23176

59. Batchelor, G.K. The stress system in a suspension of force-free particles / G.K. Batchelor // Journal of Fluid Mechanics. – 1970 – No. 41 (3). – P. 545–570. DOI: 10.1017/s0022112070000745

60. Fucano, T. Prediction of the effect of liquid viscosity on interfacial shear stress and frictional pressure drop in vertical upward gas-liquid annular flow / T. Fucano, T. Furucawa // Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. – 1997 – Vol. 2 – P. 1161–1168. DOI: 10.1016/s0301-9322(97)00070-0

61. Owen, D.G. An improved annular two-phase flow model / D.G. Owen, G.F. Hewitt // 3rd International Conference on Multi-Phase Flow. – 1987 – P. 73–84.

62. Hanratty, T.J. Physical issues in analyzing gas-liquid annular flow / T.J. Hanratty, I.A. Dykhno // Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. – 1997 – Vol. 2 – P. 1127–1136.

63. Лаптева, Е.А. Ячеечная модель тепломассопереноса в пленочных блоках оросителей градирни /Е.А. Лаптева, А.Г. Лаптев // Вестник технологического университета. – 2015 – Т. 18, № 11 – С. 181–185.

64. Petruichik, A. I. Mathematical modeling of evaporative cooling of water films in water-cooling towers / A. I. Petruichik, S. P. Fisenko // Journal of Engineering

Physics and Thermophysics. – 1999. – Vol. 72, No. 1. – P. 43-49. – DOI 10.1007/bf02699063. – EDN ZVWCGO.

65. Hydroaerothermal Research in the Design and Operation of TPP and NPP Industrial Water Supply Systems / A. S. Sokolov, T. B. Ischuk, V. I. Shishov [et al.] // Power Technology and Engineering. – 2022. – Vol. 55, No. 6. – P. 823-829.

66. Integrated analysis of cooling water systems: Modeling and experimental validation / G. F. Cortinovis, M. T. Ribeiro, J. L. Paiva [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29, No. 14-15. – P. 3124-3131. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2009.04.008. – EDN MTNKFF.

67. Лаптев А.Г. Определение тепловой эффективности и высоты блоков оросителей противоточных градирен/ А.Г. Лаптев, Е.А. Лаптева // Инженерно-физический журнал. – 2020 – Т. 93, № 3 – С. 715–721.

68. Федяев В.Л. Эффективность оросительных градирен / В.Л. Федяев, Е.М. Власов, Р.Ф. Гайнуллин //Вестник Международной академии холода. – 2012 – № 4 – С. 35–39.

69. Расчет процессов тепломассообмена в каналах оросителей вентиляторных градирен при наличии участка влажного насыщенного воздуха В.Я. Губарев, А.Г. Арзамасцев, А.Г. Ярцев, Ю.О. Морева Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2021 Т. 21, № 4 С. 21–28.

70. Бондарь К. Е. Расчет производительности градирен с полимерными оросителями при плёночном режиме течения жидкости / К. Е. Бондарь // Актуальные проблемы и направления развития технологий органического и неорганического синтеза в условиях импортозамещения : Сборник трудов II Международной научно-практической конференции, Стерлитамак, 17–19 мая 2022 года. – Уфа: Издательство "Перо", 2022. – С. 548-550. – EDN UMOVBM.

71. Рахманов Н. М. Моделирование вентиляторной градирни с полимерными оросителями / Н. М. Рахманов, И. Р. Пулатов // Тенденции развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: Материалы международной научно-практической конференции, Саратов, 17–18 марта 2016

года / ФГБОУ ВО Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, кафедра «Строительство и теплогазоснабжение»; Под редакцией Ф.К. Абдразакова;. – Саратов: ООО Амирит, 2016. – С. 214-218. – EDN WALMFT.

72. Иванов С. П. Совершенствование тепломассообменных процессов в водооборотных циклах промышленных предприятий: специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Иванов Сергей Петрович. – Уфа, 2012. – 179 с. – EDN QFMYGV.

73. Присяжная С. П. Разработка технологии в охладителях градирни за счет интенсификации тепломассообменных процессов в оросителе / С. П. Присяжная, И. М. Присяжная, Ю. В. Хондошко // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2018. – № 81. – С. 102-108. – EDN YXHSSH.

74. Давлетшин Ф. М. Опытная установка для изучения характеристик оросителей промышленных градирен / Ф. М. Давлетшин, К. Х. Гильфанов, А. А. Сагдеев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2006. – № 11-12. – С. 94-99. – EDN KFQJPT.

75. Усмонов Н. О. Повышение эффективности охлаждения оборотной воды в испарительных охладителях с псевдооживленным слоем / Н. О. Усмонов, Х. С. Исаходжаев // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2019. – № 2. – С. 37-42. – DOI 10.24160/1993-6982-2019-2-37-42. – EDN FUKWJ.

76. Новиков В.И. Исследование гидравлических закономерностей аппарата с трехфазным псевдооживленным слоем инертной орошаемой насадки: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Казань: Казанский химико-технологический ин-т им. С.М. Кирова, 1972.

77. Бляхер Н.Г. Исследование гидродинамики и массообмена в аппаратах с подвижной насадкой / Н.Г. Бляхер Л.Я., Живайкин, Н.А. Юровская // Химическое и нефтяное машиностроение. 1967. № 2. С. 18—20.

78. Шалимов, А. В. Моделирование теплообменных процессов между воздухом и водой в вентиляторной градирне с оросительным устройством

пленочного типа / А. В. Шалимов, Д. В. Ольховский // Горное эхо. – 2021. – № 3(84). – С. 118-124. – DOI 10.7242/echo.2021.3.21. – EDN ULEHXZ.

79. Левш И.П. К расчету гидравлического сопротивления и высоты трехфазного псевдооживленного слоя/И.П. Левш , Н.И. Крайнев , М.И. Ниязов // Узбекский химический журнал. 1967. № 5. С. 72—74.

80. Моделирование и расчет процесса теплообмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭС и АЭС / В. П. Жуков, М. Д. Фомичев, В. Н. Виноградов [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 3. – С. 57-63. – DOI 10.17588/2072-2672.2022.3.057-063. – EDN MGVOEB.].

81. Дмитриев А.В. Экспериментальное исследование растекания воды в струйно-пленочном контактном устройстве /А.В. Дмитриев, Л.В. Круглов, А.И. Хафизова , О.С. Дмитриева, М.А. Молчанов // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 78-80.

82. Дмитриев А.В. Определение объемного коэффициента массоотдачи в градирнях со струйно-пленочными контактными устройствами /А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, И.Н. Мадышев // Инженерно-физический журнал. – 2021. – Т. 94, № 1. – С. 121-126.

83. Гильфанов К.Х. Тепло- и массообмен при охлаждении воды в оросителях градирни с принудительной тягой /К.Х. Гильфанов , Ф.М. Давлетшин, Д.Р. Гилязов // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2009.– № 11-12. – С. 33-40.

84. Дмитриев А.В. Оценка эффективности процессов тепло- и массообмена в трехпоточной испарительной градирне с наклонно-гофрированными контактными элементами /А.В. Дмитриев , И.Н. Мадышев , Л.В. Круглов // Вестн. Казанского гос. энергетич. ун-та. – 2020. – Т. 12, № 4 (48). – С. 126-135.

85. Касаткин К.А. Разработка математической модели многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях / К.А. Касаткин, А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.Г. Орлов // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 5. – С. 61–67.

86. Случанинов Н.Н. Математическое моделирование процессов тепломассообмена в градирне / Н. Н. Случанинов, В. И. Масько, Е. В. Балашов, Е. Г. Коршунов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – № 6(64). – С. 31-32. – EDN ONRFDR.

87. Седлов А. С. Повышение охлаждающей способности градирен ТЭС с использованием аэродинамических завихрителей / А. С. Седлов, А. М. Латыпов, В. Р. Процкив, И. И. Хрушков // Новое в российской электроэнергетике. – 2019. – № 2. – С. 6-15. – EDN POUNBL.

88. Моисеев, Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев; Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности «Прикладная математика». – Москва: Федеральное государственное унитарное предприятие "Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр "Наука", 1981. – 488 с. – EDN KYNNLE.

89. Федяев В. Л. Математическое моделирование и оптимизация градирен / В. Л. Федяев // Труды Академэнерго. – 2009. – № 3. – С. 91-107. – EDN KVKOBX.

90. Математическое моделирование, численные методы и информационные системы: Сборник статей Межвузовской научно-практической конференции, Самара, 01–31 октября 2009 года. – Самара: Самарский муниципальный институт управления, 2009. – 123 с. – ISBN 978-5-94189-064-4. – EDN QJXHYZ.

91. Пономарев Н. А. Применение численных методов в математическом моделировании /Н.А. Пономарев, В.Г. Попов, Е.В. Комялова// Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2011. – Т. 3. – С. 226-229. – EDN RYLPKR.

92. Вертузаев Е.Д. Опыт масштабного перехода при разработке промышленных аппаратов / Е.Д. Вертузаев // Химическая промышленность. - 1990. - № 4. - С. 223-227.

93. Витковская Р. Ф. Аэродинамика и тепломассообмен насадочных аппаратов / Р. Ф. Витковская, А. С. Пушков, С. Шинкунас. - Санкт-Петербург: Лань, 2019. - 288 с.

94. Гельперин Н.И. Структура потоков и эффективность колонных аппаратов химической промышленности. - Москва: Химия, 1977. - 264 с.

95. Гладков В.А. Вентиляторные градирни / В. А. Гладков, Ю. И. Арефьев, В. С. Пономаренко. - Москва: Стройиздат, 1976. - Казань, 2005. - 146 с.

96. Lapteva E.A. Numerical estimation oh 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.

97. 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.

98. 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.

99. 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.

100. Совершенствование конструкций контактных устройств для градирен: монография / А. С. Пушнов, Н. П. Цурикова, С. Шинкунас [и др.] / под об. ред. А. С. Пушнова, А. Сакалаускаса. - Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. - 382 с.

101. Сокол Б. А. Насадки массообменных колонн: монография / Б. А. Сокол, А. К. Чернышев, Д. А. Баранов. - Москва: Галилея-принт, 2009. - 358 с.

102. Лаптев А.Г. Устройство и расчет промышленных градирен: монография / А. Г. Лаптев, И. А. Ведьгаева. - Казань: КГЭУ, 2004. - 180 с.

103. Холпанов Л. П. Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела: монография /Л. П. Холпанов, В. Я. Шкадов. - Москва: Наука, 1990.-271 с.
104. Дейч М. Е. Гидродинамика двухфазных сред / М. Е. Дейч, Г. А. Филлипов. - Москва: Энергоиздат, 1981. - 472 с.
105. Дьяконов С. Г. Теоретические основы и моделирование процессов разделения веществ / С. Г. Дьяконов, В. И. Елизаров, А. Г. Лаптев. - Казань: Издательство Казанского университета, 1993. - 437 с.
106. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред: монография / Р. И. Нигматулин. - Москва: Наука, 1987. - 464 с.
107. Соу С. Гидродинамика Многофазных систем: монография / С. Соу. - Москва: Мир, 1971. - 536 с.
108. Дьяконов С. Г. Теоретические основы проектирования промышленных аппаратов химической технологии на базе сопряженного физического и математического моделирования / С. Г. Дьяконов, В. В. Елизаров, В. И. Елизаров. - Казань: КГТУ, 2009. - 456 с.
109. Лаптев А. Г. Модели и эффективность процессов межфазного переноса. Часть 2. Тепломассообменные процессы: монография / А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, Е.А. Лаптева, Т. М. Фарахов; под ред. А. Г. Лаптева. - Казань: Центр инновационных технологий, 2020. - 565 с.
110. Лаптев А. Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов: монография / А. Г Лаптев. - Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2007.-500 с.
111. Лаптев А.Г. Модели и эффективность процессов межфазного переноса: монография. Часть 1. Гидромеханические процессы /А.Г. Лаптев, М.М. Башаров, Е.А. Лаптева, Т.М. Фарахов; под ред. А.Г. Лаптева. - Казань: Центр инновационных технологий, 2017. - 392 с.
112. Дзюбенко Б. В. Интенсификация тепло-и массообмена в энергетике / Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.М. Кутепов [и др.]. - Москва: ФГУП «ЦНИИАТОМ-ИНФОРМ», 2003. - 232 с.

113. Дрейцер Г. А. Предельная интенсификация теплообмена в трубах за счет искусственной турбулизации потока / Г.А. Дрейцер, И.Е. Лобанов // Инженерно-физический журнал, 2003. - Т. 76. - № 1. - С. 46-51.

114. Лаптев А. Г. Модели явлений переноса в неупорядоченных насадочных и зернистых слоях / А.Г. Лаптев, Т.М. Фарахов, Е. А. Лаптева // Теоретические основы химической технологии. - 2015. - № 4. - С. 407-414.

115. Лаптев А. Г. Математические модели и расчет коэффициентов тепло- и массоотдачи в насадках вентиляторных градирен / А.Г. Лаптев, Е.А. Лаптева // Инж.- физ. жур. - 2017. - Т. 90. - № 3. - С. 678-684.

116. Рамм В. М. Абсорбция газов: монография / В.М. Рамм. - Москва: Химия, 1976. - 655 с.

117. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов: монография / А.М. Каган, А.Г. Лаптев, А С. Пушнов, М.И. Фарахов / под ред. А. Г. Лаптева. - Казань: Отечество, 2013. - 454 с.

118. Алексеенко С. В. Экспериментальное исследование распределения жидкости в колонне со структурными насадками / Д. М. Маркович, А. Р. Евсеев, А. В. Бобылев, Б. В. Тарасов, В. М. Карстен // Теоретические основы химической технологии. - 2007. - Т. 41. - № 4. - С. 442-448.

119. Костанян А. Е. О масштабном переходе в химической технологии / А.Е. Костанян, В. В. Белова //Химическая технология. - 2016. - № 3. - С. 118-122.

120. Лаптев А. Г. Проблемы и решения масштабного перехода в химической технологии / А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов, Е. А. Лаптева // Труды Академэнерго. - 2019. - № 4. - С. 33-38.

121. Розен А. М. Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования: монография / А.М. Розен, Е.И. Мартюшин, В.М. Олевский [и др.] / под ред. А. М. Розена. - Москва: Химия, 1980. - 320 с.

122. Павленко А. Н. Развитие неравномерности распределения состава смеси в структурированной насадке дистилляционной колонны / А. Н. Павленко,

В.Е. Жуков, Н.И. Печеркин [и др.] // Теоретические основы химической технологии. - 2010. - Т. 44. - № 6. - С. 651-659.

123. Павленко А.Н. Экспериментальное исследование влияния неравномерности орошения на входе структурированной насадки на эффективность разделения смеси фреонов / А.Н. Павленко, Н.И. Печеркин, В.Ю. Чехович [и др.] // Теоретические основы химической технологии. - 2009. - Т. 43. - № 1. - С. 3-13.

124. Павлов В.П. Масштабный переход от лабораторных и опытных исследований к производству / В.П. Павлов, Е.И. Мартюшин // Химическая промышленность. - 1986. - № 8. - С. 497-501.

125. Разинов А. И. Процессы и аппараты химической технологии: монография / А.И. Разинов, А.В. Клинов, Г.С. Дьяконов. - Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. - Казань: Изд-во КНИТУ, 2017. - 860 с.

126. Меренцов Н.А. Моделирование процессов управления в нефтегазоперерабатывающем оборудовании : монография / Н.А. Меренцов, А.Б. Голованчиков, А.В. Персидский, М.В. Топилин ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – 212 с.

127. Ведьгаева И. А. Математическое моделирование, исследование и повышение эффективности работы промышленных градирен с сетчатой насадкой: специальность 05.14.04 "Промышленная теплоэнергетика": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук/Ведьгаева Ирина Александровна. – Казань, 2003. – 154 с. – EDN NOENCT.

128. Дьяконов, С. Г. Гидродинамические и массообменные характеристики рулонной насадки / С. Г. Дьяконов, В. В. Елизаров, М. И. Фарахов // Изв. вузов. Химия и химическая технология. -2003. - Т. 46. - Вып. 5. - С. 143-147.

129. Александров И.А. Массопередача при ректификации и абсорбции многокомпонентных смесей. - Ленинград: Химия, 1975. - 320 с.

130. Башаров М.М. Энергоресурсоэффективная модернизация теплообменных аппаратов и установок в нефтегазохимическом комплексе:

дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук: 05.17.08 / М. М. Башаров. - Казань, 2019 - 370 с.

131. Кафаров В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учебное пособие для вузов / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. - Москва: Высш. шк., 1991. - 400 с.

132. Лаптев Е. А. Эффективность явлений переноса в газожидкостных средах при десорбции и охлаждении жидкости: монография / Е. А. Лаптева. - Казань: Отечество, 2019. - 224 с.

133. А.Г. Касаткин Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. – 10-е изд., стереотипное, доработанное, перепечатано с изд. 1973 г. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.

134. Комиссаров Ю. А. Процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие для вузов / Ю. А. Комиссаров, Л. С. Гордеев, Д. П. Вент / под редакцией Ю. А. Комиссарова. - Москва: Химия, 2011. - 1230 с.

135. Борисов Г. С. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию. / Г. С. Борисов, В. П. Брынков, Ю. И. Дытнерский; под. ред. Дытнерского Ю. И. - Москва: Химия, 1991. - 496 с.

136. Аэров М. Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский. - Ленинград: Химия. Ленингр. отд-ние, 1979. - 176 с.

137. Столярова Е.Ю. Экспериментальные гидравлические и теплообменные 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.

138. Леонтьев В. С. Современные насадочные колонны: особенности конструктивного оформления / В С. Леонтьев, С.И. Сидоров // Химическая промышленность. - 2005. - № 7. - С. 347-350.

139. Дьяконов С. Г. Моделирование массотеплопереноса в промышленных аппаратах на основе исследования лабораторного макета / С. Г. Дьяконов, В. И.

Елизаров, А. Г. Лаптев // Теоретические основы химической технологии, 1993. - Т. 27. - № 1. - С. 4-18.

140. Соколов В. Н. Газожидкостные реакторы: монография / В. Н. Соколов, И. В. Доманский. - Ленинград: Машиностроение, 1976. - 216 с.

141. Фарахов М. М. Гидравлические и массообменные характеристики насадок «Инжехим» для контакта газа и жидкости в колонных аппаратах: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.17.08 / Фарахов Марат Мансурович. - Казань: КНИТУ и КГЭУ, 2018. - 165 с.

142. Лаптева Е.А., Столярова Е.Ю. Исследование процессов теплообмена 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.

143. 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.

144. Лаптева Е.А., Столярова Е.Ю. Эффективность охлаждения воды в мини-градирне с дискретно-шероховатой регулярной насадкой VI Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», 2021, 124-1.

145. 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» 149-1 7-9 декабря 2022г. Е.А. Лаптева, Е.Ю. Столярова, А.Г. Лаптев г. Казань.

146. 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.

147. Башаров М. М. Модернизация промышленных установок разделения смесей в нефтегазохимическом комплексе. / М.М. Башаров, Е.А. Лаптева / под ред. Лаптева А. Г. - Казань: Отечество, 2013. - 297 с.

148. Фарахов М. И. Модернизация массообменных аппаратов новыми насадками в химической технологии / М.И. Фарахов, А. Г. Лаптев, М. М. Башаров // Теоретические основы химической технологии. - 2015. - Т. 49. - № 3. - С. 247-252.

149. Патент № 2164331 С1 Российская Федерация, МПК F28С 1/00, С02F 1/64. градирня для обработки подземных вод с устойчивыми формами железа : № 99120944/12 : заявл. 01.10.1999 : опубл. 20.03.2001 / В. Л. Головин, А. Ю. Марченко ; заявитель Государственное предприятие "Дальневосточный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации". – EDN LYCTZY.

150. 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.

151. Фарахов Т.М. Гидромеханические и тепломассообменные характеристики модернизированных аппаратов с поверхностными и объемными интенсификаторами: специальность 2.6.13. "Процессы и аппараты химических технологий": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Фарахов Тимур Мансурович. – Казань, 2022. – 286 с.

152. Фарахов М. И. Импортзамещение по аппаратам очистки газов от дисперсной фазы в нефтегазохимическом комплексе / М.И. Фарахов, А.Г. Лаптев, М. М. Башаров // Химическое и нефтехимическое машиностроение, 2016. - № 5. - С. 14-16.

153. Фарахов М. И. Энергоресурсосберегающие модернизации установок разделения и очистки газов и жидкостей на предприятиях нефтегазохимического комплекса: дис. на соиск. учен. степ д-ра. техн. наук: 05.17.08 / Фарахов Мансур Инсафович. - Казань, 2009. - 358 с.

154. Лаптев А. Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии: монография / А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов, Н. Г. Минеев. - Санкт-Петербург, СТРАТА, 2015. - 576 с. .

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Таблица 1 - Результаты эксперимента с насадкой из гладких труб (плотность орошения 8,8 и 12,4 м³/(м²час))

Скорость воздуха в колонне, м/с	$w_{Г}$, м/с	0,82	1,20	1,54	1,94	2,26	2,50	0,81	1,20	1,53	1,93	2,25	2,49
Плотность орошения, м ³ /(м ² час)	$q_{ж}$	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
Температура, °С воздуха на входе	$T_{ГН}$	26,4	25,6	25,8	27,4	28,7	30	24,3	25,1	25,5	26,8	28,4	29,7
воздуха на выходе	$T_{ГК}$	28,3	27,9	27,6	27	26,7	26,6	29,1	28,7	28,2	27,8	27,4	26,9
воды на входе	$T_{жн}$	35,33	35,2	35,19	35,13	35,07	34,98	35,32	35,17	35,06	34,8	34,4	33,8
воды на выходе	$T_{жк}$	31,79	30,45	29,66	28,76	28,23	27,97	32,39	31,34	30,59	29,86	29,2	28,64
Мокрого термометра на входе	$T_{МТ}$	14,6	15,4	16,1	16,6	17,3	17,4	15,5	15,8	16,2	16,6	17,1	17,2

продолжение таблицы 1

Относительная влажность, %	$\varphi_n, \%$	37,6	39	38,7	36,4	35	33,3	39,6	40,8	39,7	37,8	35,6	33,7
Относительная влажность, %	$\varphi_k, \%$	90,8	90,8	90,8	90,9	90,9	90,9	90,7	90,7	90,7	90,8	90,8	90,8
Энтальпия воздуха, кДж/кг на входе	$I_n, \text{кДж/кг}$	47,19 1	46,15 5	46,44 6	48,77 6	50,90 7	52,80 8	43,57 9	45,97 0	46,30 3	48,22 1	50,59 3	52,38 1
на выходе	$I_k, \text{кДж/кг}$	85,78 3	84,00 0	82,68 4	80,16 1	78,89 6	78,48 1	89,38 4	87,53 9	85,27 7	83,57 0	81,82 8	79,68 8
Средняя разность энтальпий	$\Delta I_{cp}, \text{кДж/кг}$	54,87 8	52,13 1	50,52 5	48,13 8	46,20 7	44,54 2	56,59 4	52,80 2	51,33 5	48,43 0	45,11 3	41,97 3
Коэффициент массоотдачи	$(\beta_x a_v), \text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	0,658 8	0,930 8	1,118 4	1,352 5	1,513 4	1,609 5	0,741 3	1,038 9	1,247 5	1,461 9	1,652 7	1,763 6
Коэф. гидр. сопр.	ξ	0,166	0,075	0,053	0,047	0,055	0,057	0,249	0,129	0,099	0,075	0,073	0,076

продолжение таблицы 1

Эффективность по воде	$E_{ж}, \%$	19,1	25,4	29,7	35,8	40,2	42,9	14,8	20,4	24,1	28,0	31,6	33,7
Эффективность по газу	$E_{г}, \%$	45,3	44,3	42,6	38,1	35,1	33,2	51,6	48,7	46,2	40,0	41,3	39,0

Таблица 2 – Результаты эксперимента с насадкой из гладких труб (плотность орошения 15,9 и 19,4 м³/(м²час))

Скорость воздуха в колонне, м/с	$w_{г}, м/с$	0,82	1,20	1,54	1,94	2,26	2,50	0,81	1,20	1,53	1,93	2,25	2,49
Плотность орошения, м ³ /(м ² час)	$q_{ж}$	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4
Температура, °С воздуха на входе	$T_{гн}$	23,8	24,7	25,5	26,8	28,1	29,9	22,9	23,5	24,1	25,7	27,3	29
воздуха на выходе	$T_{гк}$	30,1	29,6	29,2	28,4	27,6	26,9	28,4	29,1	28,4	27,2	26,4	26,7
воды на входе	$T_{жн}$	36,01	36,1	36,11	35,09	34,14	33,14	35,93	36,16	35,62	33,68	32,55	32,77

продолжение таблицы 2

ВОДЫ НА ВЫХОДЕ	$T_{жк}$	33,56	32,69	32,28	31	29,98	29,07	33,45	33,11	32,09	30,35	29,31	29,38
Мокрого термометра на входе	$T_{мт}$	15,3	16,0	16,3	17,0	17,6	18,4	14,5	14,9	15,2	16,3	17,1	18,1
Относительная влажность, %	$\varphi_n, \%$	40,4	40,2	38,6	36,7	35,1	32,3	39,6	39,3	38,5	37,4	35,7	34,4
Относительная влажность, %	$\varphi_k, \%$	90,4	90,4	90,4	90,5	90,6	90,7	89,5	89,7	89,8	90,1	90,2	90,3
Энтальпия воздуха, кДж/кг на входе	$I_n, \text{кДж/кг Г}$	42,87 7	44,76 2	45,71 9	47,59 0	49,58 8	51,88 4	40,58 3	41,71 3	42,61 1	45,52 6	48,13 7	51,21 7
на выходе	$I_k, \text{кДж/кг Г}$	93,93 2	91,53 3	89,65 3	86,05 4	82,57 3	79,62 8	85,37 7	88,69 9	85,58 4	80,52 8	77,23 3	78,54 6
Средняя разность энтальпий	$\Delta I_{ср}, \text{кДж/кг}$	60,58 5	58,51 1	57,80 2	51,53 9	46,42 8	41,28 4	65,38 9	62,93 1	59,13 6	49,00 0	43,18 1	41,82 9

продолжение таблицы 2

Коэффициент массоотдачи	$(\beta_x a_v),$ кг/(м ³ ·с)	0,745 3	1,074 3	1,221 7	1,464 2	1,654 4	1,821 6	0,855 6	1,093 4	1,307	1,535 8	1,697 0	1,833 2
Коэф. гидр. сопр.	ζ	0,291	0,153	0,101	0,090	0,091	0,095	0,179	0,117	0,009	0,076	0,078	0,080
Эффективност ь по воде	$E_{ж}, \%$	11,8	17,0	19,4	22,6	25,2	27,5	11,6	14,4	16,5	19,1	21,0	23,2
Эффективност ь по газу	$E_{г}, \%$	54,2	50,3	47,7	46,2	44,0	41,7	46,7	48,7	47,5	46,0	43,6	42,1

Таблица 3 - Таблица – Результаты эксперимента с насадкой из гофрированных труб (плотность орошения 8,8 и 12,4 м³/(м²час))

Скорость воздуха в колонне, м/с	$w_{Г}$, м/с	0,82	1,20	1,54	1,94	2,26	2,50	0,81	1,20	1,53	1,93	2,25	2,49
Плотность орошения, м ³ /(м ² час)	$q_{ж}$	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
Температура, °С воздуха на входе	$T_{ГН}$	23,6	24,7	25,6	26,7	28,3	29	25,2	25,9	26,7	27,8	28,8	29,2
воздуха на выходе	$T_{ГК}$	27,8	27,9	27,4	26,9	26,4	26,1	29,2	28,4	27,6	26,7	26,3	26,5
воды на входе	$T_{жН}$	35,15	35,02	35,01	34,94	34,56	34,6	35,23	35,08	34,48	34,45	32,81	33,06
воды на выходе	$T_{жК}$	30,94	30,11	29,38	28,48	27,79	27,33	31,96	30,71	29,72	28,38	27,74	27,69
Мокрого термометра на входе	$T_{МТ}$	14,6	15,4	16,1	16,6	17,3	17,4	15,5	15,8	16,2	16,6	17,1	17,2

продолжение таблицы 3

Отн. влажность, %	$\varphi_n, \%$	37,1	37,1	36,7	35,4	32,9	31	35,5	34,1	33,1	31,1	30	29,4
Отн. влажность, %	$\varphi_k, \%$	90,6	90,2	90,4	90,5	90,6	90,6	90,1	90,1	90,3	90,5	90,5	90,5
Энтальпия воздуха, кДж/кг на входе	$I_n, \text{кДж/кг}$ Г	40,88 7	43,19 7	44,92 9	46,62 3	48,66 6	48,99 3	43,43 7	44,17 3	45,31 1	46,47 0	47,91 0	48,37 5
на выходе	$I_k, \text{кДж/кг}$ Г	83,42 6	83,61 6	81,56 5	79,49 5	77,46 6	76,23 5	89,43 5	85,77 7	82,37 0	78,65 2	76,99 4	77,82 9
Средняя разность энтальпий	$\Delta I_{\text{ср}}, \text{кДж/кг}$	56,21 3	52,29 0	50,51 7	48,21 9	45,29 6	44,79 8	55,08 1	52,53 6	49,06 0	46,86 2	40,30 9	40,30 4
Коэффициент массоотдачи	$(\beta_{x,a_v}), \text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$	0,764 9	0,959 3	1,138 9	1,369 5	1,528 4	1,659 9	0,850 1	1,191 4	1,390 5	1,690 0	1,804 8	1,912 1
Коэф. гидр. сопр.	ξ	0,260	0,168	0,108	0,090	0,098	0,107	0,320	0,229	0,170	0,148	0,134	0,130

продолжение таблицы 3

Эффективность по воде	$E_{ж}, \%$	20,5	25,1	29,7	35,3	39,3	42,3	16,6	22,7	26,0	34,0	32,2	33,9
Эффективность по газу	$E_{г}, \%$	47,1	46,4	42,9	39,5	36,6	34,7	52,1	48,1	45,5	43,0	42,5	41,1

Таблица 4 – Результаты эксперимента с насадкой из гофрированных труб (плотность орошения 15,9 и 19,4 м³/(м²час))

Скорость воздуха в колонне, м/с	$w_{г}, м/с$	0,82	1,20	1,54	1,94	2,26	2,50	0,81	1,20	1,53	1,93	2,25	2,49
Плотность орошения, м ³ /(м ² час)	$q_{ж}$	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4
Температура, °С воздуха на входе	$T_{гн}$	23,2	24,7	25,7	26,7	28,7	30,4	24,5	25,4	26,4	27,6	30	29,8
воздуха на выходе	$T_{гк}$	29,3	29,2	28,6	28	27,4	26,9	30,2	30,2	29,5	28,9	27,6	27,2
воды на входе	$T_{жн}$	35,23	35,18	34,62	34,62	33,49	32,64	35,97	36	35,08	34,65	32,94	32,56

продолжение таблицы 4

ВОДЫ НА ВЫХОДЕ	$T_{жк}$	32,67	31,81	31,07	30,22	29,25	28,54	33,79	32,94	31,98	31,23	29,73	29,05
Мокрого термометра на входе	$T_{мт}$	14,9	15,8	16,3	16,8	17,8	18,5	15,6	16,1	16,6	17,3	18,7	17,8
Отн. влажность, %	$\varphi_n, \%$	40,8	39	37,7	36,2	33,7	31,3	38,8	37,8	36,6	35,2	33,4	30,1
Отн. влажность, %	$\varphi_k, \%$	89,5	89,4	89,6	89,7	89,8	90	90,1	90,2	90,2	90,3	90,4	90,5
Энтальпия воздуха, кДж/кг на входе	$I_n, \text{кДж/кг}$ Г	41,76 7	44,156	45,68 4	47,07 9	50,07 1	52,33 1	43,61 8	45,07 3	46,63 5	48,51 2	52,87 5	50,14 7
на выходе	$I_k, \text{кДж/кг}$ Г	89,48 3	88,954	86,35 2	83,74 9	81,20 8	79,20 8	94,19 7	94,27 6	90,92 3	88,20 1	82,44 8	80,78 6

продолжение таблицы 4

Средняя разность энтальпий	$\Delta I_{\text{ср}},$ кДж/кг	57,97 7	54,369	50,97 0	49,27 3	42,92 6	38,43 5	60,66 2	57,38 6	52,30 8	49,18 7	40,45 9	39,77 6
Коэф. массоотдачи	$(\beta_x a_v),$ кг/(м ³ ·с)	0,814 1	1,1431	1,285 1	1,648 0	1,824 3	1,971 5	0,810 6	1,203 1	1,338 1	1,570 6	1,794 0	1,996 2
Коэф. гидр. сопр.	ξ	0,289	0,217	0,176	0,141	0,141	0,142	0,301	0,217	0,183	0,145	0,142	0,154
Эффек. по воде	$E_{\text{ж}}, \%$	12,6	17,4	19,4	24,7	27,0	29,0	10,7	15,4	16,8	19,7	22,5	23,8
Эффек. по газу	$E_{\text{г}}, \%$	53,0	51,4	49,6	45,5	44,2	42,6	54,3	53,5	52,7	50,0	46,0	45,0

Таблица 5 – Результаты эксперимента комбинированных насадок из гофрированных труб + гофрированные трубы 0,2 м в навал (плотность орошения 8,8 и 12,4 м³/(м²час))

Скорость воздуха в колонне, м/с	$w_{г}$, м/с	0,82	1,20	1,54	1,94	2,26	2,50	0,81	1,20	1,53	1,93	2,25	2,49
Плотность орошения, м ³ /(м ² час)	$q_{ж}$	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
Температура, °С воздуха на входе	$T_{гн}$	28,6	28,4	27,7	27,6	27,2	27,3	29,1	29	28,9	28,8	28,9	28,8
воздуха на выходе	$T_{гк}$	24,3	25,6	25,8	28,3	29,8	31,3	25	25,7	27,1	29,2	31,2	32,6
ВОДЫ на входе	$T_{жн}$	35,43	35,37	35,31	35,23	34,94	34,1	35,41	35,52	35,49	35,46	35,24	34,73
ВОДЫ на выходе	$T_{жк}$	31,39	30,31	29,03	28,62	27,83	27,51	32,7	31,71	30,96	30,34	30,15	29,45

продолжение таблицы 5

Мокрого термометр а на входе	T_{MT}	15,4	16,3	16,2	17,6	18,1	18,8	16,3	16,7	17,7	19,0	20,2	20,9
Отн. влажность, %	$\varphi_{\text{H}}, \%$	38,6	37,8	36,5	34,3	31,7	29,9	40,4	39,7	39,4	38,1	36,5	34,9
Отн. влажность, %	$\varphi_{\text{K}}, \%$	91,4	90,6	90,2	89,8	89,9	90	90,8	89,8	89,4	89,3	89,2	89,3
Энтальпия воздуха, кДж/кг на входе	$I_{\text{H}},$ кДж/к Г	55252	5159 5	49879	46791	43882	39081	56806	54257	50876	47213	43808	39282
на выходе	$I_{\text{K}},$ кДж/к Г	43086	4551 4	45258	49542	51240	53371	45535	46756	49846	54132	58064	60456
Средняя разность энтальпий	$\Delta I_{\text{CP}},$ кДж/кг	87546	8610 7	82743	82064	80413	80908	89453	88307	87580	87065	87460	87079

продолжение таблицы 5

Коэф. массоотда чи	$(\beta_x a_v),$ кг/(м ³ · с)	0,7467	1,001 8	1,2865	1,5021	1,6566	1,7252	0,6830	1,0056	1,2754	1,5538	1,8024	1,9274
Коэф. гидр. сопр.	ξ	0,55278 46	0,503 37	0,4743 59	0,4373 33	0,4412 06	0,4564 38	0,5806 92	0,5106 95	0,4750 76	0,4618 01	0,4650 14	0,44375 69
Эффек. по воде	$E_{ж}, \%$	20,2%	26,5 %	32,8%	37,5%	42,3%	43,1%	14,2%	20,2%	25,5%	31,2%	33,9%	38,2%
Эффек. по газу	$E_{г}, \%$	49,4%	46,6 %	43,1%	39,6%	37,1%	38,8%	50,2%	47,8%	45,1%	41,6%	39,8%	39,2%

Таблица 6 – Результаты эксперимента комбинированных насадок из гофрированных труб + гофрированные трубы 0,2 м в навал (плотность орошения 15,9 и 19,4 м³/(м²час))

Скорость воздуха в колонне, м/с	$w_{г}$, м/с	0,82	1,20	1,54	1,94	2,26	2,50	0,81	1,20	1,53	1,93	2,25	2,49
Плотность орошения, м ³ /(м ² час)	$q_{ж}$	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4
Температура, °С воздуха на входе	$T_{гн}$	25,2	26,1	27,2	29	30,7	32,3	27	26,9	27,7	29,4	31	32,5
воздуха на выходе	$T_{гк}$	29,2	29,6	29,5	29,1	28,6	28,1	30,8	30,5	30	29,4	28,6	28,2
ВОДЫ на входе	$T_{жн}$	35,51	35,5	35,44	34,77	34,06	33,12	35,8	35,74	35,62	34,81	33,71	32,97
ВОДЫ на выходе	$T_{жк}$	33,29	32,44	31,84	30,91	30,05	29,32	33,88	33,12	32,55	31,64	30,42	29,78

продолжение таблицы 6

Мокрого термометра на входе	T_{MT}	16,6	17,1	17,6	18,5	19,2	19,9	17,5	17,5	17,8	18,8	19,5	20,0
Отн. влажность, %	$\varphi_{\text{H}}, \%$	41,5	40,3	38,7	36,2	33,6	31,6	38,5	39,3	37,6	36,1	33,8	31,5
Отн. влажность, %	$\varphi_{\text{K}}, \%$	92,5	90,9	90,3	90	90,1	90,3	90,3	90,3	90,4	90,5	90,6	90,6
Энтальпия воздуха, кДж/кг на входе	$I_{\text{H}},$ кДж/кг г	46561	48005	49671	52391	54683	57046	49082	49313	50189	53286	55557	5745 4
на выходе	$I_{\text{K}},$ кДж/кг г	91102	91889	90993	88920	86702	84593	97310	95822	93457	90671	87036	8523 5
Средняя разность энтальпий	$\Delta I_{\text{ср}},$ кДж/кг	57597	53894	51564	46395	41746	36796	56067	54137	52762	47248	41024	3700 6

продолжение таблицы 6

Коэф. массоотдачи	$(\beta_x a_v),$ кг/(м ³ ·с)	0,7105	1,0469	1,2876	1,5353	1,7736	1,9082	0,7725	1,0921	1,3134	1,5154	1,8127	1,9496
Коэф. гидр. сопр.	ξ	0,5375 16	0,5326 35	0,4877 85	0,4800 22	0,4829 54	0,5102 49	0,5591 06	0,5326 27	0,5144 04	0,5113 28	0,5434 62	0,571 26
Эффек. по воде	$E_{ж}, \%$	11,7%	16,6%	20,2%	23,7%	27,0%	28,8%	10,5%	14,4%	17,2%	19,8%	23,1%	24,7%
Эффек. по газу	$E_{г}, \%$	51,2%	51,3%	49,5%	47,9%	46,1%	45,0%	55,7%	54,1%	51,4%	49,4%	47,5%	46,4%

Таблица 7 – Результаты эксперимента комбинированных насадок из шероховатых труб и «Инжехим-2012» (плотность орошения 8,8 и 12,4 м³/(м²час))

Скорость воздуха в колонне, м/с	$w_{г}$, м/с	0,82	1,20	1,54	1,94	2,26	2,50	0,81	1,20	1,53	1,93	2,25	2,49
Плотность орошения, м ³ /(м ² час)	$q_{ж}$	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4
Температура, °С воздуха на входе	$T_{гн}$	25,4	26,3	27,1	27,9	30,1	31,6	26,7	27,4	28,4	30	31,7	32,1
воздуха на выходе	$T_{гк}$	29,7	29,1	28,7	27,9	27,2	27,1	30,6	30	29,6	28,9	28,2	27,4
ВОДЫ на входе	$T_{жн}$	35,41	35,29	35,18	34,84	34,18	33,8	35,67	35,67	35,62	34,64	33,65	32,87

продолжение таблицы 7

ВОДЫ НА ВЫХОДЕ	$T_{жк}$	31,14	29,57	28,57	27,64	26,7	26,54	32,5	31,4	30,67	29,31	28,28	27,07
Мокрого термометра на входе	$T_{мт}$	14,8	15,3	15,6	16,0	17,3	18,1	15,9	16,2	16,7	17,3	18,1	18,0
Отн. влажность, %	$\varphi_n, \%$	30,7	30,1	28,9	28,2	27	25,9	31,6	30,7	29,4	27,4	25,9	24,4
Отн. влажность, %	$\varphi_k, \%$	92	91,5	91,2	91	90,6	90,3	89,4	89,6	89,7	89,6	89,8	94,6
Энтальпия воздуха, кДж/кг на входе	$I_n, \text{кДж/кг}$ Г	41340	42802	43720	44912	48650	51019	44455	45387	46678	48715	51231	50921

продолжение таблицы 7

на выходе	I_k , кДж к/кг	9315 2	89941	87881	84140	80841	80237	95631	92868	91040	87724	84706	84194
Средняя разность энтальпий	$\Delta I_{ср}$, кДж/ кг	5255 5	48815	46490	44387	39842	37398	54550	52296	50379	44155	38672	33817
Коэф. массоотдачи	$(\beta_x a_v)$, кг/(м ³ ·с)	0,82 97	1,1970	1,4529	1,6582	1,9202	1,9864	0,8319	1,1692	1,4073	1,7302	1,9918	2,4616
Коэф. гидр. сопр.	ξ	0,82 3109 228	0,8315 22367	0,8185 99875	0,7832 65725	0,7831 45588	0,7857 80956	0,8844 15849	0,8978 99623	0,8664 03801	0,8552 75333	0,8532 23346	0,8512 5365

продолжение таблицы 7

Эффек. по воде	$E_{ж}$, %	20,7%	28,6%	33,8%	38,3%	44,3%	46,2%	16,0%	21,9%	26,1%	30,8%	34,6%	39,1%
Эффек. по газу	$E_{г}$, %	56,6%	52,8%	50,4%	46,6%	42,2%	40,9%	56,7%	53,1%	50,6%	49,3%	47,6%	50,6%

Таблица 8 – Результаты эксперимента комбинированных насадок из шероховатых труб и «Инжехим-2012» (плотность орошения 15,9 и 19,4 м³/(м²час))

Скорость воздуха в колонне, м/с	$w_{г}$, м/с	0,82	1,20	1,54	1,94	2,26	2,50	0,81	1,20	1,53	1,93	2,25	2,49
Плотность орошения, м ³ /(м ² час)	$q_{ж}$	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4
Температура воздуха на входе, °С	$T_{гн}$	25,2	25,5	26,5	28,2	29,8	31,2	25,2	26,3	27,6	29,6	31,3	32,9
воздуха на выходе	$T_{гк}$	30,4	30	29,4	28,5	27,8	27,2	30,9	30,8	30,3	29,1	28,2	27,8

продолжение таблицы 8

ВОДЫ НА ВХОДЕ	$T_{\text{ЖН}}$	35,4	35,35	34,98	33,61	32,66	31,88	35,62	35,6	35	33,54	32,23	31,85
ВОДЫ НА ВЫХОДЕ	$T_{\text{ЖК}}$	32,82	31,78	30,83	29,39	28,39	27,58	33,35	32,58	31,62	29,96	29	28,42
Мокрого термометр а на входе	$T_{\text{МТ}}$	15,2	15,1	15,6	16,5	17,3	17,9	15,4	16,1	16,9	17,8	18,4	19,2
Отн. влажность , %	$\varphi_{\text{Н}}$, %	33,8	32	30,7	29,3	27,8	26,2	34,8	34,3	33,2	30,9	28,3	26,9
Отн. влажность , %	$\varphi_{\text{К}}$, %	90,3	90,3	90,4	90,5	90,5	90,6	91,4	91,3	91,4	91,5	91,6	91,5
Энтальпия воздуха, кДж/кг на входе	$I_{\text{Н}}$, кДж/кг Г	42554	42224	43540	46202	48571	50394	43074	45132	47306	50244	52172	54659

продолжение таблицы 8

на выходе	I_k , кДж к/кг	95324	93379	90592	86507	83387	80848	98661	98083	95663	89955	85880	84029
Средняя разность энтальпий	$\Delta I_{\text{ср}}$, кДж /кг	55687	53610	50447	42933	37906	34032	56122	52990	48302	40453	35108	32250
Коэф. массоотдачи	$(\beta_x a_v)$, кг/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$)	0,8541	1,2279	1,5176	1,8149	2,0813	2,3361	0,9126	1,2861	1,5800	2,0000	2,0811	2,4068
Коэф. гидр. сопр.	ξ	0,8695 57589	0,8994 53248	0,8780 98783	0,8716 33348	0,8810 00405	0,8923 05892	0,9814 29213	0,9779 05183	0,9525 80126	0,9359 46113	0,9427 27343	0,9695 16823
Эффек. по воде	$E_{\text{ж}}$, %	12,8%	17,6%	21,4%	24,7%	27,8%	30,7%	11,2%	15,5%	18,6%	22,8%	23,4%	27,1%
Эффек. по газу	$E_{\text{г}}$, %	58,4%	56,6%	54,4%	53,7%	52,0%	50,3%	60,9%	59,4%	58,3%	56,3%	55,5%	52,4%

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Таблица 1 - Основные технические характеристики теплосчётчика

Наименование параметра	Значение параметра
1	2
Диапазон измерений температуры, °С	0,01–130
Диапазон измерений разности температур, °С	3–100
Диапазон измерений объёма, м ³	0,001–99999,999
Диапазон измерений тепловой энергии, МВтч	0,001–99999,999
Пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении температуры, °С, где: t – заданное значение температуры, °С	$\pm (0,3 + 0,005t)$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении разности температур, °С, где: Δt – абсолютное значение разности температур в прямом и обратном трубопроводах, °С	$\pm (0,09 + 0,005\Delta t)$

1	2		
Пределы допускаемой относительной погрешности при измерении объёма, %: в диапазоне от q_{\min} до q_t (исключая) в диапазоне от q_t (включая) до q_{\max}	± 5 ± 2		
Пределы допускаемой относительной погрешности при измерении тепловой энергии для закрытой системы теплоснабжения, %, где: q_p/q_i – значение расхода теплоносителя и его наибольшее значение в подающем трубопроводе	$\pm (2 + 12/\Delta t + 0.012q_p/q_i)$		
Пределы допускаемой относительной погрешности при измерении времени, %	$\pm 0,1$		
Максимальная рабочая температура преобразователя расхода, °С	95		
Максимальное рабочее давление, МПа	1,6		
Диаметр условного прохода, мм	15		20
Номинальный расход, q_n , м ³ /ч	0,6	1,5	2,5
Максимальный расход, q_{\max} , м ³ /ч	1,2	3,0	5,2
Переходный расход, q_t , м ³ /ч	0,06	0,15	0,25
Минимальный расход, q_{\min} , м ³ /ч	0,024	0,06	0,1
Порог чувствительности, м ³ /ч	0,004	0,004	0,006
Напряжение питания встроенного элемента, В	3,0		

1	2	
Срок службы элемента питания, лет, не менее	6	
Габаритные размеры (длина x ширина x высота), мм, не более	110x80x120	130x80x120
Длина проточной части с переходниками, мм, не более	190	230
Длина кабеля термометра сопротивления, м, не более	1,5	
Диаметр термометра сопротивления, мм, не более	5	
Масса, кг, не более	1,5	
Рабочие условия эксплуатации: - температура окружающего воздуха, °С - атмосферное давление, кПа - относительная влажность окружающего воздуха при 35 °С, %	1,5 5 ... 55 84 ... 106,7 до 80	
Средняя наработка на отказ, ч, не менее	17000	
Средний срок службы, лет, не менее	12	

Таблица 2 -Основные технические характеристики термоанемометра СЕМ
DT-618

Скорость воздуха		
м/с	Пределы измерений	0,3 – 45,0
	Погрешность	±3% ±0,1
	Макс. разрешение	0,1
фут/мин	Пределы измерений	60 – 8800
	Погрешность	±3% ±0,1
	Макс. разрешение	10
км/час	Пределы измерений	1,0 – 140,0
	Погрешность	±3% ±0,1
	Макс. разрешение	0,1
морских миль/час	Пределы измерений	0,6 – 88,0
	Погрешность	±3% ±0,1
	Макс. разрешение	0,1
Температура		
Термометр	Пределы измерений	0 – 60 °С (32 – 140 °F)
	Погрешность	0,1
	Макс. разрешение	±2 °С(±4 °F)
Габариты	150 мм x 72 мм x 35 мм	
Вес	350 г	

Таблица 3 - Основные метрологические параметры измерителя давления ИДМ-016

1	2
Параметр (характеристика) измерителя давления ИДМ-016	Значение параметра (характеристики)
Параметры электропитания	
— от сети переменного тока напряжением, В, частотой 50 Гц	от 187 до 242
— от источника питания постоянного тока напряжением, В	от 21,6 до 26,4
Потребляемая мощность:	
— при питании от сети переменного тока, В·А	5
— при питании от источника постоянного тока, В·А	
Величина унифицированного токового выходного сигнала, мА	от 4 до 20 мА

1	2	
Пределы допускаемой приведенной основной погрешности при преобразовании измеряемых величин в унифицированный	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
Пределы допускаемой дополнительной погрешности от изменения температуры окружающей среды в рабочем диапазоне температур, на каждые 10 С, выраженная в процентах от верхнего предела измерений, %/10 С	$\pm 0,45$	$\pm 0,6$
Габаритные размеры (ВхШхГ), мм, не более		
— для щитового монтажа «Щ»	48x97x125	
— для настенного монтажа «Н»	150x125x61	
— для полевого штуцерно-резьбового монтажа моноблок исполнения «Р»	200x100x75	
Вес прибора, кг, не более		
— для щитового монтажа «Щ»	0,5	
— для настенного монтажа «Н»	0,5	
— для полевого штуцерно-резьбового монтажа моноблок исполнения «Р»	3,0	
Поддерживаемые интерфейсы связи	RS-485 Modbus RTU	
— температура окружающего воздуха, °С	от -20(-40) до +60	

1	2
— относительная влажность при температуре	от 30 до 95
— атмосферное давление, кПа	от 84 до 107
Пылеводозащита	IP40; для выносных датчиков ПРОМА-ИДМ (В) соответствующих исполнений — IP54
Средний срок эксплуатации, лет, не менее	20
Межповерочный интервал (МПИ)	3 года

Таблица 4 - Технические характеристики насоса вихревого RED VERG RD-VP40

1	2
Наименование параметра	Значение параметра
Материал корпуса насоса	чугун
Напор, м	40
Глубина (Высота) всасывания, м	9
Производительность, л/мин	35
Диаметр входного патрубка, дюйм	1
Диаметр выходного патрубка, дюйм	1
Мощность, (Вт)	370
Вес, (кг)	5,221
Параметры сети, (В/Гц)	220/50

Таблица 5 - Технические характеристики радиального вентилятора
СовПлим FS-p3400/SP

1	2
Наименование параметра	Значение параметра
Макс. расход (м ³ /мин)	6,7-36,7
Давление (Па)	3400-2200
Мощность (кВт)	1,5
Напряжение (В)	380
Масса (кг)	31
Частота вращения (об/мин)	2870

Таблица 6 - Технические характеристики высокотемпературного ИК-термометра testo 835-T2

Измерение температуры (термопара тип К (NiCr-Ni))	
Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон измерений	-50 ... +1000 °С
Погрешность	±(0,5 °С + 0,5 % от изм. знач.)
Разрешение	0,1 °С
Инфракрасное измерение температуры	
Диапазон измерений	-10 ... +1500 °С
Погрешность	±2,0 °С или ±1 % от изм. знач.
Инфракрасное разрешение	0,1 °С (-10,0 ... +999,9 °С) 1 °С (+1000,0 ... +1500,0 °С)
Общие технические данные	
Вес	514 г
Размеры	193 x 166 x 63 мм
Рабочая температура	-20 ... +50 °С
Корпус	пластик (АБС, поликарбонат)
Таблица коэффициентов излучения	20 значений в памяти прибора
Лазерное целеуказание	вкл/выкл
Стандарты	EN 61326-1:2006
Сигнальное оповещение	звуковое; оптический
Автоотключение подсветки	30 с.
Автоотключение прибора	120 с.
Тип батареи	3 элемента АА (или через USB при
Ресурс батареи	25 ч (при 25°С, с выкл. лазером и
Тип дисплея	Точечная матрица
Память	200 изм. знач.
Температура хранения	-30 ... +50 °С

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. СПРАВКИ О ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

ООО «Инженерно-внедренческий центр «Инжехим»

Юридический адрес: 107113, г. Москва,
ул. Маленковская, д. 32, строение 2А, офис №73
ИНН/КПП 1655010900/771801001
ОГРН 1021602853975
ОКПО 27823698 ОКВЭД 28.29.1



Почтовый адрес: 420049, г. Казань,
ул. Шалапина, д. 14/83
Тел.: (843) 570-23-18, факс: 570-23-28
E-mail: info@ingehim.ru, ingehim@kstu.ru
Web: http://www.ingehim.ru

Исх. № 041023/363
от «04» октября 2023г.



Справка

О применении результатов научных исследований Столяровой Екатерины Юрьевны, представленных в диссертационной работе на тему: **"Повышение тепловой эффективности охлаждения воды в пленочной градирне с комбинированными блоками оросителей"**, а также в научных статьях:

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.

В работах Столяровой Е. Ю. выполнены экспериментальные исследования и разработана математическая модель тепломассообмена в контактных устройствах при пленочном противотоке воды и воздуха в градирне. Получены численная и упрощенная математическая модель структура потока для расчёта тепловой эффективности регулярных и комбинированных насадок (блоков оросителей) в широком интервале нагрузок по фазам. Причём численная модель позволяет учесть неравномерность профиля воздуха на входе, а упрощённая модель имеет практическое значение для инженерных расчетов в проектных организациях и инжиниринговых фирмах.

Результаты данной работы поменяются при предпроектной разработке аппаратов пленочного типа для промышленных предприятий в нефтехимической и нефтегазоперерабатывающей отраслях промышленности, выполняемых в ИВЦ "Инжехим".

Заместитель директора
по технике и технологии



Н. Г. Минеев



*исх. № 301-02/1846
25.09.2023*

«Утверждаю»

Главный инженер филиала

АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-1

Хайбуллин
Р.Р. Хайбуллин

« 25 » 09 2023 г.

Справка

О внедрении научно – технических разработок, выполненных в диссертационной работе Столяровой Е.Ю. на тему: «Повышение тепловой эффективности охлаждения воды в пленочной градирне с комбинированными блоками оросителей» при Казанском государственном энергетическом университете.

В результате научных исследований в диссертационной работе Столяровой Е.Ю. получены экспериментальные данные и разработана математическая модель эффективности охлаждения воды при противоточном пленочном движении фаз в градирне с учетом неоднородностей профиля скорости воздуха. Разработана и запатентована конструкция мини градирни с большой гидравлической нагрузкой (до 40 м³/(м²ч). Показано снижение удельных затрат на охлаждение воды.

Работа имеет теоретическую и практическую значимость и может быть использована при модернизации схемы для охлаждения воздуха в системе маслоохладителя (МО) дожимного компрессора ТАКАТ 22/6-45 УХЛ1 ГТУ на Казанской ТЭЦ-1. Воздух для охлаждения масла в зимний период подается из атмосферы, однако данная схема не работает в летний период года из-за высокой температуры воздуха. Для эксплуатации МО в летний период времени в корпус генератора встроены два трубчатых воздухоохладителя, в которых для охлаждения

КАЗАНСКАЯ ТЭЦ-1

ФИЛИАЛ АО «ТАТЭНЕРГО» ул.Тукая, д.125, г.Казань, Республика Татарстан, индекс 420054
«ТАТЭНЕРГО» АЖ ФИЛИАЛЫ Тукай ур., 125 нче йорт, Казан шәһәре, Татарстан Республикасы, индекс 420054
+7 843 202-48-59, +7 843 202-47-65 (факс) E-mail: office@ktec1.tatenergo.ru www.tatenergo.ru, ИНН 1657036630,
КПП 165902001, р/сч 40702810643240000050 в Филиале Банка ВТБ (ПАО) в г. Нижнем Новгороде к/сч 30101810200000000837 БИК 042202837

воздуха подается циркуляционная вода оз. Кабан. Ввиду низкого качества воды оз. Кабан трубопроводы и воздухоохладители регулярно забиваются ракушкой и илом. Внедрение системы охлаждения МО дожимного компрессора ТАКАТ 22/6-45 УХЛ1 в имеющуюся схему оборотного охлаждения блоков ПГУ с башенной градирней БГ-1600 является нецелесообразным ввиду территориальной удаленности объектов. Установка мини градирни с насадками может быть применена в летний период времени для доведения температуры охлаждающего воздуха в системе МО дожимного компрессора ТАКАТ 22/6-45 УХЛ1 ГТУ до номинальной. Создание оборотной системы охлаждения, путем установки мини градирни и отказа от использования в цикле МО воды оз. Кабан также будет способствовать предотвращению биологического обрастания ракушкой и илом трубопроводов охлаждающей воды и воздухоохладителей.

Все научно – технические разработки выполнены на высоком уровне и обеспечивают увеличению надежности производственного оборудования.

Начальник котлотурбинного цеха

**филиала АО «Татэнерго» Казанская
ТЭЦ-1**

Залялов А.С.

КАЗАНСКАЯ ТЭЦ-1

ФИЛИАЛ АО «ТАТЭНЕРГО» ул.Тукая, д. 125, г. Казань, Республика Татарстан, индекс 420054
«ТАТЭНЕРГО» АЖ ФИЛИАЛЫ Тукай ур., 125 нче йорт, Казан шәһәре, Татарстан Республикасы, индекс 420054
+7 843 202-48-59, +7 843 202-47-65 (факс) E-mail: office@ktec1.tatenergo.ru www.tatenergo.ru
ИНН 1657036630, КПП 165902001, р/с 40702810800000000073 в ФБ ПАО «АКИ БАНК» г.Казань, к/с 30101810300000000916, БИК 049205916