

На правах рукописи



Круглов Леонид Вадимович

**ГИДРОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОБМЕН
В МИНИГРАДИРНЯХ СО СТРУЙНО-ПЛЕНОЧНЫМ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ВОДЫ И ВОЗДУХА ПРИ МАЛЫХ ТОЧКАХ
ОРОШЕНИЯ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Казань – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
Дмитриев Андрей Владимирович

Официальные
оппоненты: **Попов Игорь Александрович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения;

Афанасенко Виталий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», заведующий кафедрой механики и конструирования машин.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград.

Защита диссертации состоится «9» сентября 2021 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.02 при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-225).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на сайте <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/199?idDiss=119>

Автореферат диссертации разослан « 16 » июня 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.082.02,
кандидат технических наук

Власов
Сергей
Михайлович

Общая характеристика работы

Актуальность работы. На сегодняшний день энергоэффективность и энергосбережение являются важнейшими направлениями технологического развития экономики России. Энерго- и ресурсосбережение можно рассматривать как оптимизацию энергетических ресурсов, технологических процессов, поиск новых рациональных путей использования энергии и сырья. В современных условиях модернизация существующих теплообменных аппаратов, которая заключается в использовании современных высокоэффективных контактных устройств, взамен устаревших является одним из эффективных способов энергосбережения.

По данным учета использования воды в Российской Федерации около 40 км³ свежей воды расходуется промышленностью, что составляет 20% всего водозабора из источников водоснабжения, тогда как остальная часть воды (160 км³) приходится на оборотное водоснабжение. Оборотное водоснабжение – наиболее прогрессивный способ обеспечения водой промышленных предприятий всех отраслей, позволяющий решить экологические и экономические задачи.

Большинство современных испарительных градилен обладает рядом недостатков, а именно – плохая смачиваемость насадочных элементов, неравномерность распределения воды по сечению аппаратов, большой капельный унос. В связи с этим, **актуальной** задачей является повышение тепловой эффективности работы аппаратов для охлаждения оборотной воды. Для этого требуется внедрение новых устройств, для контакта жидкости и газа, позволяющих обеспечить минимальный унос жидкости газовым потоком, минимальное гидравлическое сопротивление и большую поверхность контакта фаз.

Охлаждение оборотной воды предприятий многих отраслей промышленности весьма перспективно может быть осуществлено при использовании струйно-пленочных контактных устройств, за счет равномерного распределения жидкости по всей рабочей зоне аппарата.

Цель работы и основные задачи исследования. Целью работы является разработка эффективных оросителей градилен на основе использования струйно-пленочных контактных устройств для охлаждения оборотной воды промышленных предприятий, теоретические и экспериментальные исследования, обобщение гидрогазодинамическим и теплообменным характеристикам.

В непосредственные задачи исследования входило:

1. на основе анализа недостатков существующих устройств, предназначенных для охлаждения оборотной воды промышленных предприятий атмосферным воздухом, разработать новые конструкции устройств, сочетающих в себе высокую производительность и эффективность протекания процесса;
2. экспериментальные исследования растекания воды по разработанным перегородкам в струйно-пленочных контактных устройствах;
3. исследование гидрогазодинамики в разработанных струйно-пленочных контактных устройствах с целью повышения эффективности и пропускной способности;
4. разработка математического описания процесса охлаждения воды атмосферным воздухом в струйно-пленочных теплообменных контактных устройствах;
5. экспериментальные исследования струйно-пленочных контактных устройств при различных конструктивных параметрах и нагрузках по воде и воздуху для проверки адекватности математического описания;

б. разработка инженерной методики расчета сконструированных струйно-пленочных контактных устройств, для охлаждения оборотной воды.

Научная новизна работы:

- 1) экспериментальным путем получены зависимости гидравлического сопротивления от скорости воздуха на входе в рабочую зону и отношения расходов воды и воздуха в разработанном струйно-пленочном теплообменном контактном устройстве;
- 2) получены экспериментальные зависимости эффективности теплообмена в предложенной конструкции от соотношения удельных расходов фаз, скорости жидкости, начальной температуры жидкости;
- 3) в результате численного эксперимента в программном пакете ANSYS Fluent получены значения уноса и предельной среднерасходной скорости газа в струйно-пленочных теплообменных контактных устройствах при малых точках орошения;
- 4) экспериментально получено выражение для расчета объемного коэффициента массоотдачи при охлаждении воды в предлагаемых контактных устройствах.

Обоснованность и достоверность. Достоверность и обоснованность подтверждается использованием фундаментальных уравнений сохранения и переноса теплоты, импульса и массы, а также хорошим согласованием расчетных и экспериментальных данных. Надежность опытных данных подтверждается их воспроизводимостью в однотипных сериях экспериментов, а также использованием для их получения современных и сертифицированных средств измерения.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- 1) представлен анализ миниградирен по эффективности охлаждения, показана экономическая выгода охлаждения оборотной воды в струйно-пленочных контактных устройствах;
- 2) разработаны конструкции контактных устройств для теплообменных процессов и аппаратов (патенты РФ № 171022, № 166480);
- 3) разработана инженерная методика расчета струйно-пленочного контактного устройства, обеспечивающая возможность определения характерных параметров аппарата при различных нагрузках по воде и воздуху, с целью оптимизации процесса охлаждения оборотной воды;
- 4) предложенная конструкция струйно-пленочного контактного устройства рекомендована к внедрению на ФКП «КЗТМ» г. Казань с целью повышения эффективности охлаждения воды на существующих производствах;
- 5) проведен сравнительный анализ по энергетическим затратам поперечноточной миниградирни и противоточной миниградирни с внедрением струйно-пленочных контактных устройств;
- б) проведен сравнительный анализ значений объемных коэффициентов массоотдачи с различными типами оросителей, широко используемых в промышленности и энергетике.

Методологическая основа и методы исследования:

- 1) численное моделирование гидро- и газодинамики аппаратов со струйно-пленочными контактными устройствами в программном комплексе ANSYS Fluent;
- 2) проведение экспериментальных исследований гидро- и газодинамики, теплообмена в аппаратах со струйно-пленочными контактными устройствами;
- 3) статистическая обработка и обобщение экспериментальных данных;
- 4) математическое моделирование процесса массопередачи на контактной ступени струйно-пленочного устройства на основе законов сохранения.

На защиту выносятся:

- 1) результаты теоретического и экспериментального исследований процессов в разработанных струйно-пленочных контактных устройствах в зависимости от различных их конструктивных параметров и нагрузок по воздуху и воде;
- 2) математическое описание процесса охлаждения оборотной воды в разработанных струйно-пленочных теплообменниках контактных устройствах;
- 3) результаты численных и экспериментальных исследований для получения зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от отношения массовых расходов воздушной и водяной фаз при различной скорости воздуха на входе в аппарат;
- 4) результаты экспериментального исследования растекания воды по перегородкам струйно-пленочного контактного устройства с лепестками. Выявленные рациональные размеры этих лепестков, при которых пленка имеет наибольшую площадь;
- 5) на основе обработки опытных данных получено выражение для расчета объемного коэффициента массоотдачи при охлаждении воды в предлагаемых контактных устройствах.

Личный вклад автора. Все результаты численных и физических экспериментов, представленные в диссертации, получены лично автором. Обсуждения результатов исследований проводились совместно с научным руководителем д.т.н., доцентом Дмитриевым А.В.

Апробация работы. Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на двадцать третьей Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2017); Международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 2017); XII Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения» (Казань, 2017); V Международной молодежной научной конференции посвященной памяти Почетного профессора УрФУ В.С. Кортова «Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2018» (Екатеринбург, 2018); XIII Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения» (Казань, 2018); XII международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки» (Томск, 2018), XIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия 2018» (Иваново, 2018), III(XVIII) Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Молодая мысль – развитию энергетике» (Братск, 2018).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 24 печатных работы, в том числе 5 статей, опубликованных в научных изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России для соискателей ученых степеней доктора и кандидата наук, 3 в международных базах цитирования Scopus и Web of Science, 2 патента РФ на полезные модели, 14 докладов на международных научных конференциях.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, содержащих основные результаты исследования, выводов по работе и списка литературы, включающего 103 наименований. Работа изложена на 125 страницах, содержит 85 рисунков и 4 таблицы.

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования. Показана научная и практическая значимость полученных результатов. Обозначены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе показаны масштабы использования оборотного водоснабжения. Представлен обзор существующих конструкций аппаратов охлаждения оборотной воды. Отмечены их достоинства и недостатки. На основе проведенного анализа конструкций предложено струйно-пленочное контактное устройство (рис. 1).

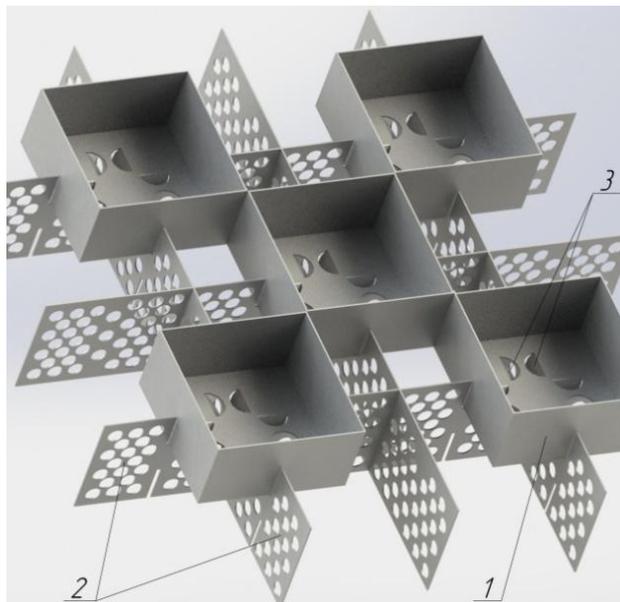


Рис. 1. Внешний вид струйно-пленочного контактного устройства

Основным отличием от прототипа является наличие перфорированной перегородки. Отверстия в вертикальных перегородках расположены по вершинам равносторонних треугольников. Наличие отверстий в вертикальных перегородках приводит к турбулизации стекающей водяной пленки, благодаря чему уменьшается толщина ее вязкого пограничного слоя. Данное решение позволяет снизить металлоемкость конструкции, выравнивает профиль концентраций в стекающей пленке воды, кроме того, наблюдается более равномерное распределение воды по поверхности перегородок. Экспериментальные исследования, проведенные на струйно-пленочном контактном устройстве, по определению эффективности массообменного процесса показывают, что выполнение отверстий в перегородках приводит к повышению эффективности массообмена в среднем на 10,5...38,7% по сравнению с прототипом.

Во второй главе представлены исследования по гидродинамике воды в струйно-пленочных контактных устройствах. В частности, исследовано истечение воды через отверстия сбоку сливных стаканов.

Чтобы определить эффективность разработанных перегородок, была создана экспериментальная установка, на которой был проведен ряд исследований. В результате выявлено, что с увеличением уровня жидкости в 6 раз площадь растекания жидкости по пластине возрастает примерно в 4 раза. Также стоит отметить, что с уменьшением расстояния между лепестком и источником истечения площадь растекания воды также увеличивается, и по самой пластине она распределяется достаточно равномерно.

Результаты показали, что лепесток следует располагать ближе к источнику и задавать большую скорость истечения воды. В этом случае вода распределяется равномернее и занимает большую поверхность.

В третьей главе показана структура потока газа на свободной поверхности жидкости в сливных стаканах. Выявлены условия работы с минимальным уносом. Получены зависимости влияния ширины сливного стакана на предельную скорость газа в контактном устройстве.

Было сделано предположение о том, что гидравлическое сопротивление струйно-пленочных контактных устройств возможно с достаточной точностью рассчитать без применения программных пакетов.

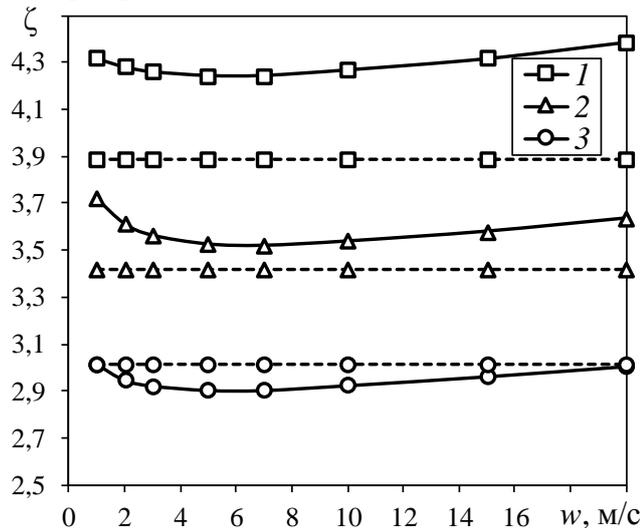


Рис. 2. Зависимость коэффициента местного сопротивления от скорости в модели совокупности диафрагм при $b = 0,1$ м; H , м: 1 – 0,325; 2 – 0,36; 3 – 395; h_1 , м: 1 – 0,01; 2 – 0,02; 3 – 0,03

Значения, полученные при моделировании потока в программном комплексе, обозначены сплошными линиями; данные, полученные после расчетов – штриховые (рис. 2). Сравнение результатов исследования показало, что рассчитать гидравлическое сопротивление струйно-пленочного контактного устройства возможно без использования трехмерного моделирования в программных пакетах. Конструкцию следует рассматривать как совокупность диафрагм, так как отклонение в этом случае не превышает 11%, что вполне приемлемо для инженерного расчета.

В четвертой главе приведено разработанное математическое описание процесса испарительного охлаждения воды в струйно-пленочных контактных устройствах.

В математическом описании высота элемента разбивается на 3 части. Первая часть и третья имеют высоту h , а вторая h_1 . В первой части газ контактирует с жидкостью, стекающей в виде пленки по перегородке 2, и жидкостью, находящейся в сливном стакане 1. Газ поступает равномерно по высоте. Во второй и третьей частях происходит контакт газа со стекающей пленкой жидкости. В третьей части газ отводится равномерно по высоте.

Рассматривается единичный элемент конструкции, в котором поток паровоздушной смеси контактирует с поверхностью воды, протекающей в виде плёнки на вертикальной стенке (участки F_2 , F_3 , F_4) или находящейся в сливном стакане (участок F_1). Заданы параметры потоков на входе в элемент – температура t'_{va} , °С, расход G'_m воздуха (“сухого”), кг/с, влагосодержание x в нём, г/кг (грамм пара на кг сухого воздуха), а для воды – температура t_L , °С, и расход L_m .

Общий объём элемента делится на 4 зоны, в каждой из которых требуется определить характеристики теплообмена. Зоны 1 и 2 разделены сверх начальной постановки для однотипности, то есть те же параметры потоков на границах зон. Для решения считаются заданными значения площадей теплообменных поверхностей F_1, F_2, F_3, F_4 и значения коэффициента теплоотдачи в каждой из зон (α_l для F_2, F_3, F_4 и α_1 для F_1).

Предположения, основные факторы, схематизация: а) Радиационным теплообменом пренебрегаем, б) учитывая, что коэффициент теплоотдачи в воде намного больше, чем от поверхности к паровоздушной смеси, можно пренебрегать этой теплоотдачей в жидкости, рассматривая единую температуру воды в сечении потока, в) при схематизации можно использовать представление о разделении потоков на части. При этом часть воды проходит через зону только с теплообменом и полностью выходит из неё. Другая часть полностью испаряется. Для последней, ввиду её малости и небольшого изменения температур в зоне, будем учитывать только теплоту испарения, пренебрегая теплотой на охлаждение перед испарением. Затем, соответственно, догревом образовавшегося пара в паровоздушной смеси. Предполагается, что испарение происходит при температуре жидкости, средней для поверхности теплообмена,

г) для расчета массоотдачи использовалась методика, взятая из работы [Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. Теплообмен: учебное пособие для вузов. – М.: МЭИ, 2006. – 550 с.] по массовой доле пара $c_v = \rho_v/\rho$. При этом у поверхности воды с температурой t_l принимается концентрация насыщения $c_s(t_l)$. Давление пересчитывалось в концентрацию по формуле $x_s = m/[p/p_s - (1-m)]$, где p_s – парциального давления p_s насыщенного водяного пара; $m = M_v/M_a = 18/29$. Полученная таблица затем аппроксимировалась выражением типа

$$x_s = (t / 312,5 + 0,6741)^{14}, \quad (1)$$

которая обеспечивает вполне приемлемую точность при температуре t от 0 до 90°C.

д) В данных исследованиях не учитывался теплообмен с твёрдыми стенками ввиду его незначительности. Вертикальная стенка под плёнкой воды симметрично омывается с другой стороны такой же плёнкой, так что теплоотдачи нет.

е) Коэффициент массоотдачи рассчитывается по формуле Льюиса.

ж) Таким образом, схемы и математические модели для каждой из четырёх зон однотипны. Небольшое отличие есть у зоны 1 – если в остальных зонах средняя температура теплообменной поверхности принимается равной среднеарифметической между входной и выходной температурой воды, то в зоне 1 это температура воды в сливном стакане, принимаемая равной выходной температуре воды.

Уравнения теплообмена должны устанавливать связь входных и выходных температур и расходов в каждой зоне, а значения этих данных для смежных зон должны соответственно приравниваться друг другу или входным значениям для всего элемента в зонах 1 и 4.

з) Теплофизические характеристики сред (теплота фазового перехода r , Дж/кг, теплоёмкости сред, Дж/(кг·К), (воды c_{pl} , сухого воздуха c_{pa} , и пара c_{pv}) считаются постоянными, т.е. не зависящими от температуры. Теплоёмкость смеси берётся аддитивно: $c_{pva} = c_{pv} \cdot c_v + c_{pa}(1 - c_v)$.

Для каждой зоны можно записать уравнения, связывающие входные (один штрих) и выходные (два штриха) значения температур и расходов. Расход сухого воздуха G_a один во всех зонах, он задавался и был постоянным.

Это нелинейная система уравнений, дающая связь, например, выходных характеристик с входными, если считать последние заданными. В записанной форме она пригодна для расчёта методом итераций. Однако можно ожидать, что итерации будут сходиться лишь при достаточно больших расходах. Если нужны расчёты для малых расходов, потребуется усовершенствование метода или вообще другие методы (Ньютона и др.).

Поскольку в этой схеме имеет место противоток, то сразу рассчитывать зону за зоной нельзя – входные значения на границах зон сначала неизвестны. Совокупность условий для всех зон также образует систему уравнений. Её тоже можно пытаться решать методом итераций, следующего уровня относительно итераций внутри зон.

Исследования показали, что скорость воздуха влияет на теплообмен незначительно, так как увеличение коэффициентов тепло- и массоотдачи уравновешивается снижением времени контакта.

Влияние ширины сливных стаканов оказалось весьма существенным. Это происходит из-за увеличения удельной площади поверхности контакта газа и жидкости.

Температура воды, на выходе из струйно-пленочного контактного устройства, существенно снижается при уменьшении относительного расхода воды. В то же время температура воздуха малочувствительна к этому технологическому параметру.

Как и ожидалось, увеличение коэффициентов тепло- и массоотдачи приводит к росту температуры воздуха и снижению температуры воды.

Во всех случаях графики изменения температуры воздуха и влагосодержания полностью аналогичные.

Следует констатировать, что контактные устройства не должны быть слишком большими, а поверхности контакта воды и воздуха необходимо интенсифицировать.

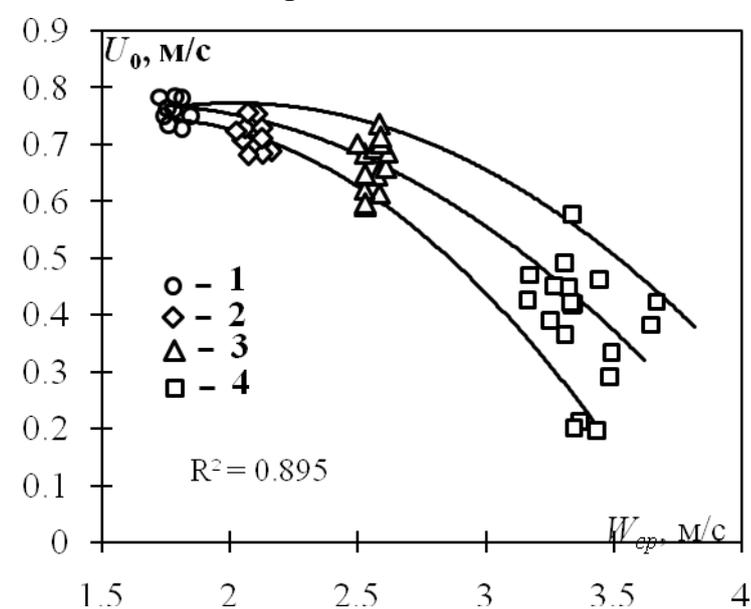


Рис. 3. Зависимость между скоростью истечения из отверстия воды и среднерасходной скоростью воздуха при различных уровнях жидкости в тарелках h , м: 1 – 0,0051; 2 – 0,0071; 3 – 0,0101; 4 – 0,0204

Как видно из графика, с ростом уровня жидкости увеличивается предельное значение среднерасходной скорости воздуха, которое можно задать, при условии, что жидкость не будет уноситься. Также следует

В пустом пространстве рекомендуется расположить насадку с крупными каналами, что позволит существенно повысить эффективность при относительно небольшом росте гидравлического сопротивления.

В пятой главе представлена разработанная методика расчета основных конструктивных размеров струйно-пленочного контактного устройства.

При численном расчёте контактного элемента изменялся уровень жидкости в сливных стаканах. При изменении уровня жидкости, наблюдалась зависимость скорости истечения жидкости из отверстия от предельной среднерасходной

отметить, что большим среднерасходным скоростям движения воздуха соответствуют малые скорости истечения жидкости из отверстия, в противном же случае, наблюдается большой процент уноса жидкости. Для данного процесса, путем аппроксимации была получена математическая зависимость:

$$U_0 = -0,1126W_{cp}^2 + 0,3647W_{cp} + 0,4753. \quad (2)$$

где U_0 – скорость истечения воды из отверстия, м/с; W_{cp} – среднерасходная скорость воздуха, м/с.

Данное уравнение представляет собой квадратичный полином, где значение достоверности аппроксимации составляет 0,8954. Выражение позволяет определить среднерасходную скорость движения воздуха, при которой происходит полный унос жидкости, ее значение равно 4,2 м/с.

Также было выявлено, что устройство работает достаточно эффективно при скорости 3,2 м/с (рис. 3), что является достаточно высоким показателем. Это говорит о большой пропускной способности устройства.

Зависимость уноса жидкости от среднерасходной скорости запишется:

$$E_{yn} = 0,3319e^{1,2502W_{cp}}. \quad (3)$$

Далее задается соотношение массовых расходов жидкости и газа, исходя из материального баланса. С увеличением массового расхода воды по отношению к массовому расходу воздуха происходит уменьшение уноса жидкости.

После того как были определены соотношения массовых расходов и предельная среднерасходная скорость воздуха, появляется возможность определить площадь сечения аппарата, при которой развиваемая скорость воздуха не будет приводить к уносу жидкости, а аппарат будет работать достаточно эффективно. В случае, если корпус аппарата уже собран, а площадь сечения известна, представляется возможность определить максимальную скорость воздуха, которую можно задать.

Зная скорость истечения жидкости через отверстие (2) и задавая массовый расход жидкости, можно определить диаметр центрального отверстия.

Таким образом, в работе представлена инженерная методика расчета струйно-пленочного контактного устройства, включающая в себя определение скорости истечения жидкости из отверстия в сливном стакане, среднерасходной скорости движения воздуха, определение геометрических параметров устройства.

Расчет гидродинамики в предлагаемой конструкции контактных устройств осложнен разнообразием форм контакта фаз, сложностью учета распада струй на капли и необходимостью учета интенсификации тепло- и массообмена падением капель на поверхность раздела газ–жидкость. В связи с этим, для исследования эффективности охлаждения оборотной воды в струйно-пленочных контактных устройствах, его гидравлических и тепломассообменных характеристик была собрана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 4.

Исследуемый аппарат состоит из трех контактных ступеней, общей высотой 510 мм. Контактная ступень представляет собой два сливных стакана шириной 120 мм, расположенных друг над другом на расстоянии 90 мм. При этом высота стенки сливного стакана составляет 60 мм. В стенке сливного стакана были выполнены отверстия диаметром 4 мм на расстоянии 30 мм от дна. Эксперименты проводились на системе воздух–вода. Вода с помощью распределительного устройства подавалась сверху внутрь контактного элемента. Среднерасходная скорость потока охлаждающего воздуха (на полное сечение устройства) варьировалась в диапазоне 1,26–2,33 м/с; плотность орошения 10–18 м³/м²·ч;

температура воздуха 30–32,9°C; температура воды 38,4–45,6°C. Относительная влажность воздуха во время проведения эксперимента изменялась в пределах 28,4–40,2%. Температура и относительная влажность воздуха на входе в теплообменник измерялись термогигрометром testo 605i. Температура воды на входе и выходе из теплообменника измерялась измерителем-регулятором двухканальным ОВЕН 2ТРМ1. Расход жидкости измерялся ротаметром, скорость воздуха измерялась термоанемометром testo 405i, имеющим относительную погрешность не более 5%.

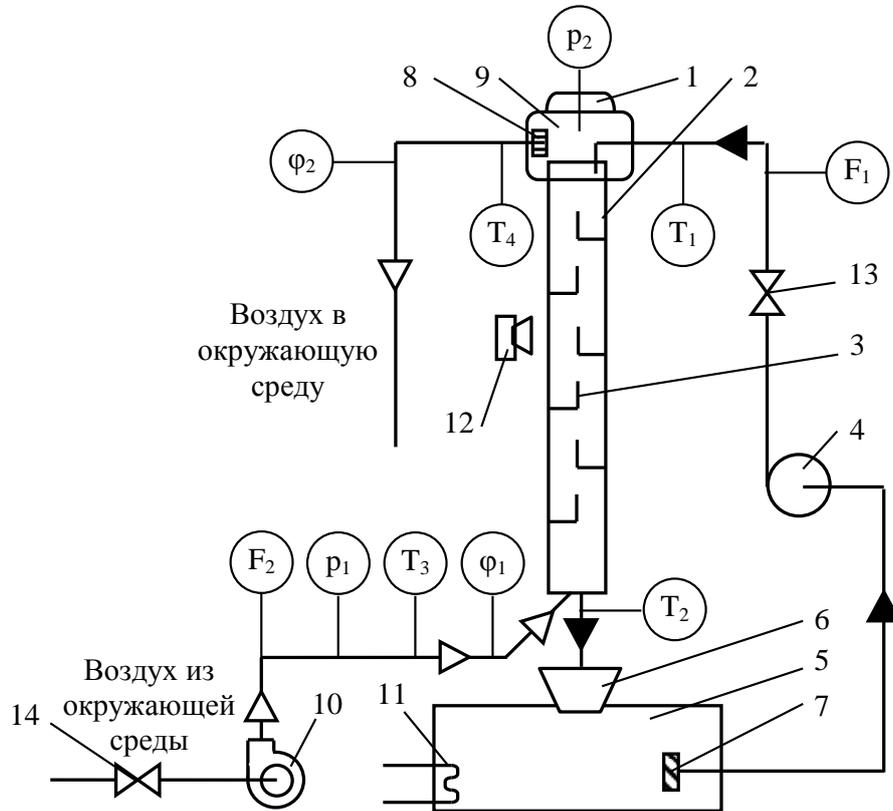


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:

1 – крышка; 2 – теплообменник; 3 – струйно-пленочные контактные устройства; 4 – насос; 5 – емкость; 6 – воронка; 7 – жидкостной фильтр; 8 – сепаратор; 9 – емкость; 10 – вентилятор; 11 – нагревательный элемент; 12 – видеокамера; 13 – запорная арматура на линии подачи воды; 14 – запорная арматура на линии подачи воздуха

На рис. 5 представлена зависимость теплового КПД от среднерасходной скорости воздуха и соотношения массовых расходов жидкой и воздушной фаз на струйно-пленочных контактных устройствах. Как видно из графиков, увеличение плотности орошения приводит к незначительному повышению теплового КПД. Так, например, при увеличении плотности орошения с 14 до 18 м³/м²·ч наблюдается рост теплового КПД в среднем на 11%.

Таким образом, можно сделать вывод, что при проведении тепло- и массообменных процессов в аппаратах со струйно-пленочными контактными устройствами необходимо стремиться к выбору таких значений скоростей воздуха, удельных нагрузок L_m/G_m и плотностей орошения, которые соответствуют относительно высокой тепло- и массообменной эффективности при низком гидравлическом сопротивлении. Основное преимущество использования струйно-пленочного контактного устройства в градирнях происходит за счет экономии

энергетических ресурсов и воды, равномерного распределения воды по сечению аппарата.

Результаты экспериментальных исследований по охлаждению воды в струйно-пленочных контактных устройствах позволяют оценить изменение влагосодержания насыщенного воздуха на входе в блок градирни и на выходе из него.

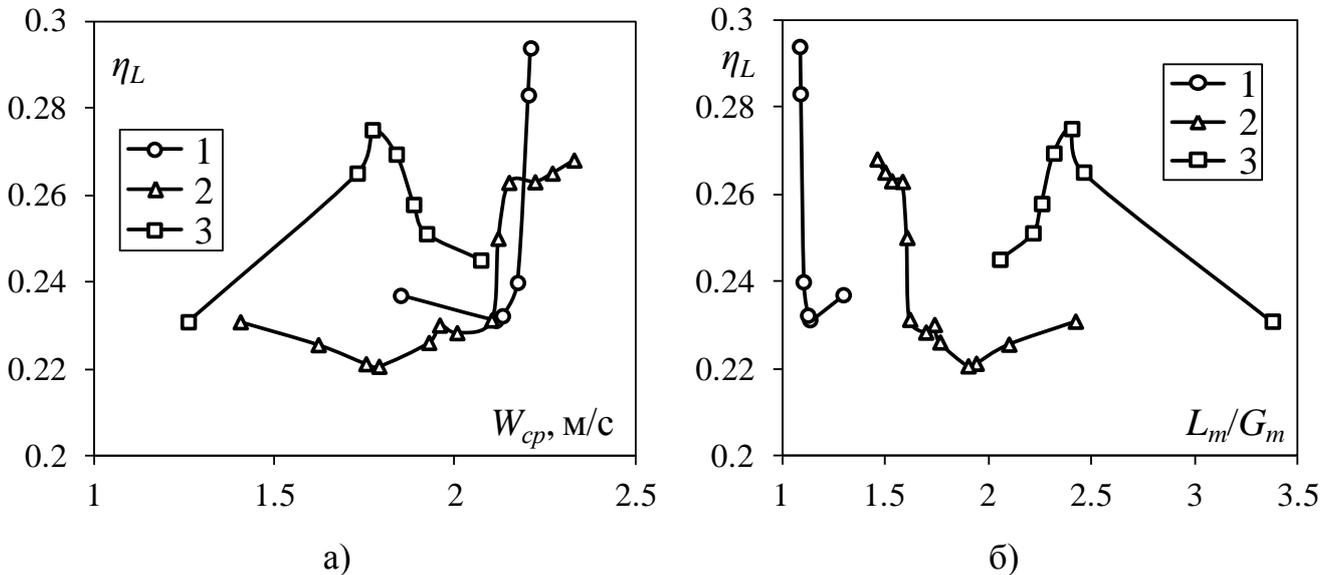


Рис. 5. Изменение теплового КПД от среднерасходной скорости воздуха (а) и соотношения массовых расходов жидкой и воздушной фаз (б) при различных плотностях орошения q_L , $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$: 1 – 10; 2 – 14; 3 – 18

На основе обработки опытных данных, получено выражение для расчета объемного коэффициента массоотдачи при охлаждении воды в предлагаемых контактных устройствах в виде:

$$\beta_{Vx} = 1,66 \cdot q_L \cdot \left(\frac{G_m}{L_m} \right)^{0,8} \quad (4)$$

где: G_m – массовый расход воздуха, кг/с; L_m – массовый расход воды, кг/с, q_L – плотность орошения, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

Полученное эмпирическое уравнение (4) позволяет оценить значение объемного коэффициента массоотдачи для разработанной насадки. При аппроксимации опытных данных максимальная относительная погрешность составила не более 8%, а средняя относительная погрешность не превышает 2,3%.

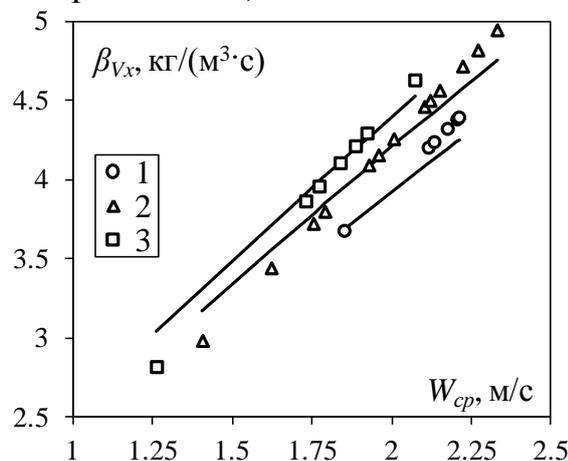


Рис. 6. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от среднерасходной скорости воздуха при различных плотностях орошения q_L , $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$: 1 – 2,73; 2 – 3,88; 3 – 4,85; точки – эксперимент, линии – расчет по уравнению (4)

Из графика, представленного на рис. 6, видно, что увеличение среднерасходной скорости воздуха приводит к росту значений объемного коэффициента массоотдачи. Это связано с увеличением степени турбулентности газового потока и ростом касательных напряжений, приводящие к увеличению коэффициента массоотдачи согласно аналогии Чилтона-Кольборна. С увеличением плотности орошения наблюдается также повышение объемного коэффициента массоотдачи, обусловленное увеличением смоченной поверхности насадки. Однако, увеличение плотности орошения на 77,6% приводит к росту значений объемного коэффициента массоотдачи в среднем всего лишь на 5,5%.

Сравнение значений объемных коэффициентов массоотдачи с различными типами оросителей, широко используемых в промышленности, представлено на рис. 7. Расчеты проводились для градири с площадью орошения 100 м^2 , массовый расход воды составлял 896 т/ч , массовый расход воздуха изменялся от $239,2 \text{ т/ч}$ до $2939,2 \text{ т/ч}$.

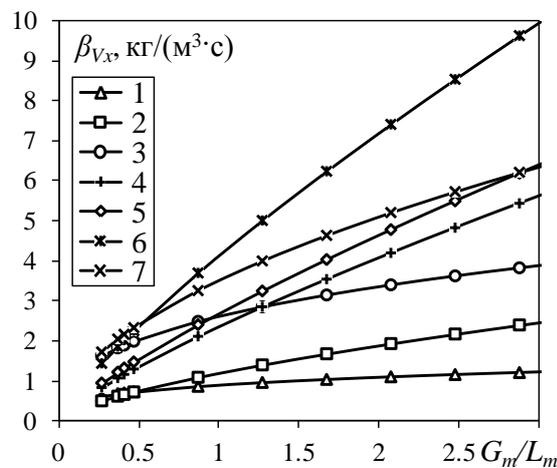


Рис. 7. Зависимость объемного коэффициента массоотдачи от соотношения удельных нагрузок воздуха и воды для различных блоков оросителей градири: 1 – капельно-пленочный ороситель ($A = 0,36$; $n = 0,28$); 2 – пленочный асбестоцементный ($A = 0,479$; $n = 0,66$); 3 – ороситель призма ПР50 ($A = 1,05$; $n = 0,36$); 4 – сетчатая насадка (по уравнению $\beta_{vx} = 0,93q_L^{1,02} (G_m/L_m)^{0,79}$); 5 – сетчатая насадка (по уравнению $\beta_{vx} = 1,04q_L^{1,04} (G_m/L_m)^{0,79}$); 6 – предлагаемый струйно-пленочный ороситель ($A = 1,66$; $n = 0,8$); 7 – ороситель из решетчатых элементов ПР50 ($A = 1,41$; $n = 0,54$)

Видно, что при малых соотношениях удельных нагрузок (G_m/L_m до 0,5) наиболее эффективным является ороситель из решетчатых элементов. Далее при увеличении массового расхода воздуха наибольший объемный коэффициент массоотдачи наблюдается у предлагаемых струйно-пленочных устройств. Это обуславливается высокой степенью интенсификации перемешивания в стекающей пленке жидкости при высоких скоростях воздуха. Кроме того, отличительной особенностью разрабатываемых контактных устройств является возможность устойчивой работы с минимальным уносом жидкой фазы при среднерасходных скоростях воздуха до $2,4 \text{ м/с}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа обзора существующих перспективных конструкций контактных устройств были разработаны и защищены патентами конструкции струйно-пленочных контактных устройств, благодаря которым достигается равномерное

распределение воды по рабочей зоне аппарата, снижение энергетических затрат.

Предложенные конструкции рекомендованы к внедрению на ФКП «КЗТМ».

2. Получены уравнения для определения геометрических размеров струйно-пленочного контактного устройства с целью обеспечения устойчивой работы аппарата. Установлено, что в устройстве с шириной сливного стакана 200 мм барботаж начинается при скорости воздуха 2,4 м/с.

3. В результате экспериментальных и численных исследований получены зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз при различной скорости воздуха на входе в аппарат.

4. Экспериментально исследовано растекание воды по перегородкам струйно-пленочного контактного устройства с лепестками. Выявлен рациональный размер этих лепестков, при котором пленка воды имеет наибольшую площадь растекания – 15мм.

5. Разработано математическое описание процесса охлаждения воды в струйно-пленочных контактных устройствах. Получены зависимости входных и выходных температур и расходов, показано, что теплообмен зависит от ширины сливного стакана, коэффициента теплоотдачи, в то же время скорость воздуха не оказывает большого воздействия на теплообмен.

6. На основе обработки опытных данных, получено выражение для расчета объемного коэффициента массоотдачи при охлаждении воды в предлагаемых контактных устройствах.

7. Представлено сравнение значений объемных коэффициентов массоотдачи с различными типами оросителей, широко используемых в промышленности. Оценочные энергетические затраты на перекачивание воды могут быть снижены более чем в 1,3 раза по сравнению с градирней БМГ-100.

ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Конструкции всех мокрых градирен в большей, или меньшей степени контактируют с охлаждаемой оборотной водой. Это касается как рабочих колес, корпусов вентилятора, на которые попадают капли воды и конденсируется пар, так и несущих конструкций, обшивки, систем водораспределения. В России подавляющее большинство градирен проектируются из металла. В условиях промышленных объектов с наличием химически агрессивной среды для увеличения срока службы применяются различные способы защиты - эмали, цинкосодержащие составы, горячее оцинкование. Опыт эксплуатации показывает, что металлические градирни, вследствие коррозии, требуют проведения ремонтных работ с частичной или полной заменой элементов, а также необходимостью полной остановки оборудования. Все это приводит к большим финансовым потерям, росту стоимости владения и сокращению сроков эксплуатации градирни. Выходом из данной ситуации может быть применение профилей из армированного волокнами стеклопластика. Он обладает высокой коррозионной, химической, электрохимической и биологической стойкостью. Следует также отметить, что при использовании современных смол, его физико- механические характеристики так же высоки. Наибольшей прочностью и жесткостью обладают стеклопластики, содержащие ориентированно расположенные непрерывные волокна. При этом вес изделий в несколько раз ниже аналогичных стальных, что существенно облегчает монтажные работы. Срок службы, заявленный изготовителями, более 25 лет. Однако, изделия из этих материалов обладают плохой смачиваемостью поверхности, поэтому желательно выполнить исследования работы

струйно-пленочных контактных устройств выполненных из армированного стеклопластика.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Дмитриев А.В. Оценка эффективности процессов тепло- и массообмена в трехпоточной испарительной градирне с наклонно-гофрированными контактными элементами. / А.В. Дмитриев, И.Н. Мадышев, Н.Д. Чичирова // **Вестник Казанского государственного энергетического университета** 2020 – Т. 12 – №4(48) – С. 127-135.
2. Дмитриев, А. В. Охлаждение оборотной воды предприятий энергетики в градирнях со струйно-пленочными контактными устройствами / А. В. Дмитриев, Л. В. Круглов, И. Н. Мадышев, О. С. Дмитриева // **Промышленная энергетика**. 2018. – №11 – С. 45-49.
3. Дмитриев, А. В. Гидравлическое сопротивление струйно-пленочного контактного устройства / А. В. Дмитриев, Л. В. Круглов, О. С. Дмитриева // **Промышленная энергетика**. – 2017. – № 5. – С. 44-47.
4. Шарипов, И.И. Разработка конструкции струйно-пленочного контактного устройства с целью интенсификации тепломассообмена /И.И. Шарипов, Л.В. Круглов, В.И. Круглов, О.С. Дмитриева // **Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики**. 2018. – Т. 26 – № 9-10.– С. 136-143
5. Дмитриев, А. В. Методика расчета гидравлического сопротивления струйно-пленочных контактных устройств в теплоэнергетическом оборудовании / А. В. Дмитриев, Л.В. Круглов, А. И. Хафизова, О. С. Дмитриева, Е. Г. Шешуков // **Вестник Казанского государственного энергетического университета**. - 2018 – Т. 10 – №2(38) – С. 53-59.

В изданиях, включенных в международную базу цитирования SCOPUS и Web of Science:

6. Dmitrieva, O.S. Calculation of the average velocity of the liquid in the stream-film contact devices / O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev, L.V. Kruglov // **Procedia Engineering**. – 2016. – V. 150. – P. – 753-760. DOI:10.1016/j.proeng.2016.07.101
7. Dmitrieva, O.S. Impact of the liquid level in the jet-film contact devices on the heat-and-mass transfer process / O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev, I.N. Madyshev, L.V. Kruglov // **MATEC Web of Conferences**. – 2017. – V. 129. – P. 06010. DOI: 10.1051/matecconf/201712906010
8. Yakimov, N.D. Mathematical Description of Water-Cooling Process in Jet-Film Contact Devices / N.D. Yakimov, L.V. Kruglov, A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva // **Chemical and Petroleum Engineering**. – 2019. – Vol. 55. – Issue 1–2. – P. 101-107. DOI: 10.1007/s10556-019-00588-8

Патенты и свидетельства:

9. Пат. 166480 Российская Федерация, МПК F28C 1/00, F28F 25/08. Струйно-пленочная градирня / Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Круглов Л.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГЭУ». – № 2016119704/06; заявл. 20.05.2016; опубл. 27.11.2016, Бюл. № 33. – 2 с.
10. Пат. 171022 Российская Федерация, МПК B01D 3/20. Контактное устройство с пленочным течением жидкости для тепломассообменных аппаратов / Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н., Николаев А.Н., Круглов Л.В.; заявитель и

патентообладатель ФГБОУ ВО «КГЭУ». – № 2017100316; заявл. 09.01.2017; опубл. 17.05.2017, Бюл. № 14. – 6 с.

Публикации в других изданиях:

11. Дмитриев, А.В. Определение средних коэффициентов теплоотдачи последовательно падающих капель в потоке газа / А.В. Дмитриев, Л.В. Круглов, О.С. Дмитриева // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 5. – С. 27-29.

12. Хафизова, А.И. Определение коэффициента массоотдачи в жидкой фазе в струйно-пленочном контактном устройстве / А.И. Хафизова, Л.В. Круглов, О.С. Дмитриева // Двадцать третья международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2-3 марта 2017 г.): тезисы докладов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 159.

13. Хафизова, А.И. Среднерасходная скорость стекания жидкости в струйно-барботажных контактных устройствах / А.И. Хафизова, Л.В. Круглов // XIII Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия 2018» (г. Иваново, 3-5 апреля 2018 г.): материалы конференции. В 6 т. Т. 1. – Иваново: ИГЭУ, 2018. – С. 89.

14. Хафизова, А.И. Теплоотдача от свободной поверхности струйно-пленочного элемента к потоку газа / А.И. Хафизова, Л.В. Круглов // III(XVIII) Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Молодая мысль – развитию энергетике» (г. Братск, 23-27 апреля 2018 г.): материалы конференции. – Братск: Изд-во БрГУ, 2018. – С. 380-382.

15. Хафизова, А.И. Определение коэффициента теплоотдачи от свободной поверхности струйно-пленочного элемента к потоку газа / А.И. Хафизова, Л.В. Круглов // XIII Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 24-27 апреля 2018 г.): материалы докладов конференции в 3 т. Т. 2. – Казань: КГЭУ, 2018. – С. 137-139.

16. Хафизова, А.И. Динамика газожидкостного потока в струйно-пленочном контактном устройстве с отверстиями сбоку / А.И. Хафизова, Л.В. Круглов, О.С. Дмитриева // XII международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы современной науки» (г. Томск, 23 мая 2018 г.): сборник статей по материалам конференции. В 3 ч. – Уфа: Изд. Дендра, 2018. – Ч. 1. – С. 161-165 и др.