

0-802061

На правах рукописи



**ДМИТРИЕВА ОКСАНА СЕРГЕЕВНА**

**ТЕПЛОМАССОБМЕН В ГРАДИРНЯХ ВИХРЕВОГО ТИПА  
С РАСПЫЛИТЕЛЯМИ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Николаев Андрей Николаевич.

Официальные оппоненты: Попов Игорь Александрович,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры теоретических основ  
теплотехники ФГБОУ ВПО «Казанский  
национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ»;

Лаптева Елена Анатольевна,  
кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры промышленных  
теплоэнергетических установок и систем  
теплоснабжения ФГБОУ ВПО «Казанский  
государственный энергетический университет».

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский  
университет «Московский энергетический  
институт», г. Москва.

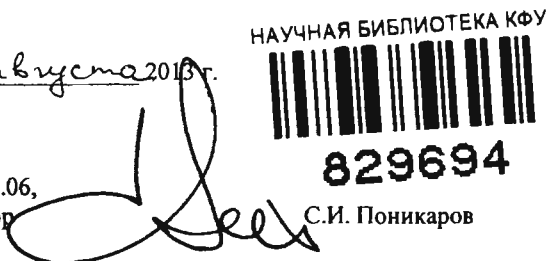
Защита состоится «27» сентября 2013 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.080.06 при ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» по адресу: 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета (А-330).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, Казанский национальный исследовательский технологический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.080.06.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Казанского национального исследовательского технологического университета.

Автореферат разослан «22» августа 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.080.06,  
доктор технических наук, профессор



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** На сегодняшний день почти во всех отраслях промышленности наблюдается проблема охлаждения оборотной воды до требуемых температур, особенно в летний период. В качестве водоохладителей используются, как правило, естественные или искусственные водоемы, а также градирни. Следует отметить, что во многих регионах имеется дефицит свежей воды, поэтому необходимо стремиться к снижению её потребления. Кроме того, использование природных водоемов недопустимо, потому что сброс воды повышенной температуры в них ведет к нарушению экологической системы. В процессе эксплуатации градирен существует множество проблем, таких как неравномерное распределение воды по сечению; унос капельной влаги и вредных веществ из градирен, приводящий к негативному воздействию на окружающую среду; в зимнее время происходит обледенение элементов градирни и выход их из строя.

Вышеизложенное обуславливает актуальность разработки технологического процесса охлаждения оборотной воды энергетических установок промышленных предприятий в вихревых камерах.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-206.2012.8 на выполнение научно-исследовательских работ по теме «Разработка диспергирующих устройств для теплообменных аппаратов с высокой пропускной способностью» (договор № 16.120.11.206-МК от 1 февраля 2012 г.).

**Цель работы и основные задачи исследования.** Целью работы является разработка эффективных аппаратов на основе вихревой камеры для охлаждения оборотной воды промышленных предприятий, теоретическое и экспериментальное исследование гидрогазодинамики и теплообмена в разработанных аппаратах.

В непосредственные задачи исследования входило:

- 1) на основе анализа недостатков существующих способов, предназначенных для охлаждения оборотной воды промышленных предприятий, разработать новые конструкции аппаратов для охлаждения циркуляционной воды атмосферным воздухом, сочетающие в себе высокую производительность, малое гидравлическое сопротивление и высокую эффективность протекания процесса;
- 2) разработка устройств распределения воды в объеме сконструированных аппаратов, теоретическое и экспериментальное исследование влияния геометрических и технологических параметров на их работоспособность;
- 3) исследование гидрогазодинамики в разработанных вихревых камерах с разбрызгивающими устройствами для охлаждения оборотной воды с целью повышения её эффективности и пропускной способности;
- 4) разработать математическое описание процесса охлаждения воды атмосферным воздухом в вихревых камерах с разбрызгивающими устройствами;
- 5) провести экспериментальные исследования вихревых камер с разбрызгивающими устройствами для проверки достоверности математического описания в зависимости от различных конструктивных

параметров аппарата и нагрузок по газу и жидкости;

б) на основе анализа математического описания разработать инженерную методику расчета сконструированных вихревых камер с разбрызгивающими устройствами для охлаждения оборотной воды.

**Научная новизна работы:**

- 1) разработана математическая модель процесса охлаждения оборотной воды воздухом в предложенных вихревых камерах с разбрызгивающими устройствами и получены зависимости геометрических размеров аппарата от требуемой степени охлаждения;
- 2) экспериментальным путем получены зависимости гидравлического сопротивления от скорости воздуха на входе в рабочую зону и отношения расходов жидкой и газовой фаз в разработанном вихревом аппарате с дисковым распылителем;
- 3) получены уравнения для определения геометрических размеров дискового распылителя;
- 4) получены экспериментальные зависимости эффективности теплообмена в предложенном аппарате от соотношения удельных расходов фаз, скорости газа на входе в аппарат, начальной температуры жидкости, радиуса аппарата, степени крутки, высоты лопаток завихрителя.

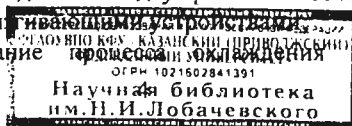
**Обоснованность и достоверность** полученных результатов подтверждается хорошей сходимостью теоретических исследований с результатами собственных экспериментов, а также с экспериментальными данными других авторов, применением законов сохранения импульса и массы.

**Практическое значение работы:**

- 1) представлен анализ водоохладителей по эффективности охлаждения, показана экономическая целесообразность охлаждения оборотной воды в установках с вихревыми камерами;
- 2) разработаны конструкции аппаратов с закрученным потоком, устройств распределения газа и жидкости, контактных устройств для теплообменных процессов и аппаратов (патенты РФ № 87924, № 89000, № 96786, № 99339, № 102309, № 102984, № 115234, № 2480699, № 127881);
- 3) разработана инженерная методика расчета вихревой камеры с дисковым распылителем, обеспечивающая возможность определения характерных параметров аппарата при различных нагрузках по воде и воздуху с целью оптимизации процесса охлаждения оборотной воды;
- 4) предложенная конструкция вихревой камеры с разбрызгивающими устройствами принята к внедрению на ООО «Татнефть-Пресскомполит» г. Елабуга с целью повышения эффективности охлаждения оборотной воды на существующих производствах в аппаратах вихревого типа.

**На защиту выносятся:**

- 1) результаты теоретического и экспериментального исследований работоспособности разработанных разбрызгивающих устройств в зависимости от различных их конструктивных параметров и нагрузок по газу и жидкости;
- 2) комплекс исследований динамики двухфазного газожидкостного потока в вихревых камерах с разбрызгивающими устройствами;
- 3) математическое описание процесса охлаждения оборотной воды в



- разработанных вихревых камерах с разбрызгивающими устройствами;
- 4) результаты экспериментальных исследований эффективности процесса охлаждения воды в разработанных аппаратах вихревого типа;
  - 5) зависимости для расчета геометрических размеров дискового распылителя при условии равномерного орошения рабочей зоны вихревой камеры каплями воды;
  - 6) инженерная методика расчета характерных параметров вихревых камер с дисковым распылителем, учитывающая различные нагрузки по воде и воздуху.

**Личный вклад автора.** Все результаты работы получены Дмитриевой О.С. под руководством д.т.н., профессора Николаева А.Н.

**Апробация работы.** Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «Инновации и высокие технологии XXI века» (Нижнекамск, 2009); XI Международной конференции молодых ученых «Пищевые технологии и биотехнологии» (Казань, 2010); X Международной научно-практической конференции «Экология и ресурсо- и энергосберегающие технологии на предприятиях народного хозяйства» (Пенза, 2010); Международной научно-практической конференции «XXXIX Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2010); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Проблемы безопасности и защиты населения и территорий от ЧС (Безопасность – 2011)» (Уфа, 2011); Всероссийской научно-практической конференции «Теория и практика инновационного развития: федеральный, региональный и муниципальный аспекты» (Нижнекамск, 2011); Республиканской научно-практической конференции, посвященной Международному году химии «Высокоэффективные технологии в химии, нефтехимии и нефтепереработке» (Нижнекамск, 2011); VII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 50-летию первого полета человека в космос «Молодёжь и наука» (Красноярск, 2011); Всероссийской молодежной конференции с элементами научной школы «Нефть и нефтехимия» (Казань, 2011); Международной научно-практической конференции «XL Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2011); Международной научно-методической конференции «Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – фундамент подготовки специалистов будущего» (Салават, 2012); Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 30-летию механического факультета НХТИ «Актуальные инженерные проблемы химических и нефтехимических производств и пути решения» (Нижнекамск, 2012); на ежегодных научных сессиях КГТУ (Казань, 2011, 2012, 2013); XXV Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25» (Волгоград, 2012).

По результатам исследований, выполненных в рамках диссертации, автору была присуждена специальная государственная стипендия Республики Татарстан (2012), стипендия Президента Российской Федерации (2011/2012, 2012/2013 учебные годы).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 34 печатных

работы, в том числе 17 статей, опубликованных в научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 9 патентов РФ на полезные модели и изобретения, 5 докладов на международных научных конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, содержащих основные результаты исследования, выводов по работе и списка литературы, включающего 119 наименований. Работа изложена на 127 страницах, содержит 73 рисунка и 5 таблиц.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи исследования, показана научная и практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен аналитический обзор способов охлаждения оборотной воды, требуемой на технологические и иные нужды, выявлены достоинства и недостатки каждого из них. Проведенный анализ показал, что наиболее рациональным подходом к решению задачи эффективного охлаждения циркуляционной воды на предприятиях химической, нефтехимической, энергетической и другой промышленности является разработка и исследование аппаратов на основе вихревых камер.

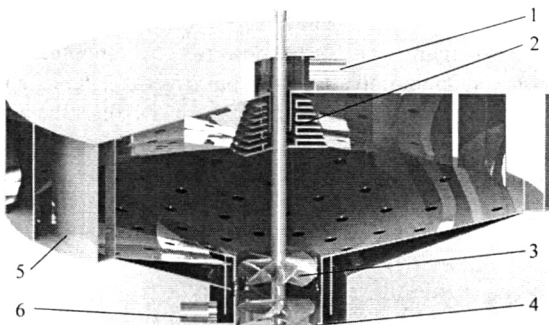


Рис. 1. Вихревая камера с дисковым распылителем (в разрезе): 1 – патрубок для входа оборотной воды; 2 – дисковый распылитель; 3 – лопасти; 4 – патрубок для выхода воздуха; 5 – тангенциально-лопаточный завихритель; 6 – патрубок для выхода охлажденной воды

Выполнен обзор известных вихревых камер. Сделан вывод о перспективности использования вихревых аппаратов в качестве водоохлаждателей при применении в них разработанных в рамках диссертационной работы разбрызгивающих устройств для равномерного заполнения рабочей зоны каплями воды.

Общий вид разработанной вихревой камеры с дисковым распылителем представлен на рисунке 1. Обратная вода поступает в аппарат через патрубок 1, далее попадает в распылитель 2, откуда распределяется по дискам разного диаметра. При вращении вала, вода срывается с дисков распылителя 2 в виде капель, отбрасывается в разные стороны, при этом образуется объемный факел распыла. Причем, вращаясь с одинаковой угловой скоростью, диски, имея разный диаметр, создают полидисперсный распыл, что обеспечивает равномерное заполнение рабочей зоны вихревой камеры каплями, исключаются застойные зоны в аппарате и увеличивается тепломассообменная эффективность процесса.

Лопастей 3 крепятся на валу, расположены в патрубке для выхода воздуха 4 в несколько рядов на некотором расстоянии друг от друга, увеличивая при этом объем рабочей зоны вихревой камеры. Вращающиеся на валу лопасти 3 создают пониженное давление в патрубке для выхода воздуха 4, что обеспечивает его тягу в аппарат через тангенциально-лопаточный завихритель 5. Воздух приобретает вращательное движение, перемещаясь к центру аппарата, капли вовлекаются в совместное вращательное движение, что увеличивает поверхность межфазного взаимодействия и интенсивность протекания процесса охлаждения.

Под действием центробежной, гравитационной сил и силы аэродинамического сопротивления капли движутся к коническому днищу аппарата по равновесным траекториям. Далее вода стекает вниз через отверстия, выполненные в стенке конического днища, попадает на поверхность днища без перфорации, после чего охлажденная вода выводится из вихревой камеры через патрубок 6. Другая её часть стекает в виде пленки, заполняя зазор между лопастями 3 и внутренней стенкой патрубка для выхода воздуха 4, что позволяет приблизить значение потребляемой мощности к полезной, и направляется через отверстия в патрубок для выхода воды 6.

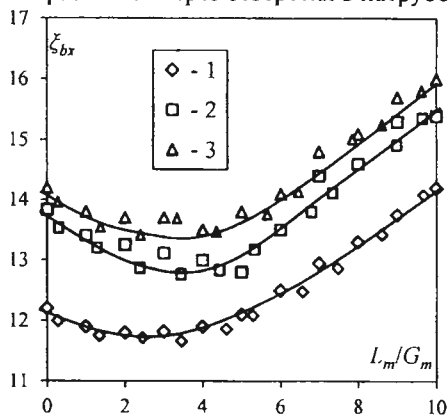


Рис. 2. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления вихревой камеры с дисковым распылителем от отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз,  $W_{br}$ , м/с: 1 - 5; 2 - 10; 3 - 15; сплошная линия - расчет, точки - эксперимент

зависимостью на рисунке 2. Сопоставление данных, полученных по формуле Короткова Ю.Ф., с экспериментальными показывает их хорошую сходимость. С увеличением входной скорости воздуха в вихревую камеру коэффициенты гидравлического сопротивления сухого и орошаемого аппарата возрастают.

При разбрызгивании воды дисковым распылителем капли выходят на свои равновесные траектории за очень малый промежуток времени, относительное осевое смещение капель при этом менее 0,012, что обеспечивает их

Достоинством аппарата является высокая эффективность протекания теплообменных процессов при относительно низких энергетических затратах, отсутствие мелких проходных сечений исключает их засорение.

Во второй главе проведен комплекс исследований динамики двухфазного газожидкостного потока в вихревых камерах с разбрызгивающими устройствами, описана схема экспериментальной установки для исследования работоспособности разработанных разбрызгивающих устройств.

Результат измерения гидравлического сопротивления вихревой камеры с дисковым распылителем представлен

минимальное столкновение в рабочей зоне камеры и равномерное распределение.

Для расчета эффективности вихревых камер с разбрызгивающими устройствами необходимо знать диаметр капель, находящихся в рабочей зоне аппарата. Диаметр капель, которые должны находиться на равновесном радиусе  $r_p$ , определяется:

$$a = 2,176 r_p \left( \frac{R_a W_{rR}}{\nu_G} \right)^{-\frac{3}{8}} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{\frac{5}{8}} \left( 1 + \frac{R_a - r_p}{h} \operatorname{tg}(\chi) \right)^{-\frac{7}{8}} \left( \frac{AR_a}{\varepsilon h} \right)^{\frac{5}{4}}. \quad (1)$$

Минимальный диаметр капель, образующихся в аппарате, рассчитывается исходя из условия отсутствия уноса из рабочей зоны ( $r = D_n/2$ ):

$$a_{\min} = 2,176 \frac{D_n}{2} \left( \frac{R_a W_{rR}}{\nu_G} \right)^{-\frac{3}{8}} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{\frac{5}{8}} \left( 1 + \frac{R_a - D_n/2}{h} \operatorname{tg}(\chi) \right)^{-\frac{7}{8}} \left( \frac{AR_a}{\varepsilon h} \right)^{\frac{5}{4}}. \quad (2)$$

Максимальный диаметр капель, образующихся в аппарате, рассчитывается исходя из условия ( $r = R_a$ ):

$$a_{\max} = 2,176 R_a \left( \frac{R_a W_{rR}}{\nu_G} \right)^{-\frac{3}{8}} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{\frac{5}{8}} \left( \frac{AR_a}{\varepsilon h} \right)^{\frac{5}{4}}. \quad (3)$$

Отношение максимального и минимального диаметров капель:

$$\frac{a_{\max}}{a_{\min}} = \frac{2R_a}{D_n} \left( 1 + \frac{R_a - D_n/2}{h} \operatorname{tg}(\chi) \right)^{\frac{7}{8}}. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что отношение максимального и минимального диаметров капель зависит только от геометрических размеров рабочей зоны аппарата. Причем это соотношение не зависит от коэффициента крутки завихрителя.

В третьей главе приведены результаты комплекса исследований тепло- и массообмена в вихревой камере с разбрызгивающими устройствами.

Для оптимальной работы аппарата необходимо, чтобы все капли после контакта с воздухом имели одинаковую температуру. В испарительных градирнях этого можно добиться, если будет выполняться условие:

$$t_{L0} - t_{a1} = \frac{n_a \pi a_i^2 \beta_{Gi} (x - x^*) r}{L_m c_L} = \text{const}. \quad (5)$$

Определим минимальное количество дисков из условия  $a_{\min}/a_{\max} = 1$ , тогда уравнение для расчета минимального количества дисков распылителя запишется в виде:

$$n_{d\min} = \frac{C}{\Delta z} \left( C - (h - \Delta z) \sqrt{\frac{D_n}{2R_a h}} \right), \quad (6)$$

где  $C = \sqrt{h + (R_a - D_n/2) \operatorname{tg}(\chi)}$ .

Рост минимального количества дисков распылителя наблюдается при увеличении высоты лопаток завихрителя и угла наклона образующей днища к оси завихрителя, что объясняется увеличением высоты рабочей зоны аппарата.

Увеличение расстояния между дисками распылителя, как и диаметра патрубка для выхода воздуха ведет к снижению минимального количества дисков распылителя.

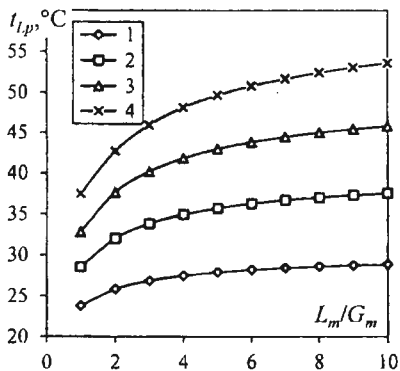


Рис. 3. Зависимость равновесной температуры жидкости от отношения массовых расходов воды и воздуха при начальной температуре воды, °С: 1 – 30, 2 – 40, 3 – 50, 4 – 60;  $t_{G0} = 20^\circ\text{C}$ ;  $\varphi = 75\%$ ,  $p = 101325$  Па

В градирнях, для оценки эффективности охлаждения, за равновесный параметр целесообразно принять температуру воды, которая рассчитывается исходя из достижения равновесного состояния в аппарате. Она является минимальной температурой охлажденной воды в вихревой камере. Исследования показали, что на равновесную температуру воды существенно влияют начальные температуры воды и воздуха. Увеличение отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз приводит во всех случаях к повышению равновесной температуры жидкости (рис. 3). Исследования показали, что доля теплообмена испарением составляет от 40% до 90%.

Для определения степени охлаждения оборотной воды и эффективности протекания процесса необходимо знать конечную температуру жидкости. Для этого запишем уравнение теплового баланса по аппарату:

$$L_m c_L (t_{L0} - t_{Lk}) = \sum_{i=1}^{n_s} L_{mi} c_{Li} (t_{L0} - t_{ai}). \quad (7)$$

Температура охлажденной воды на выходе из аппарата может быть определена из выражения (7):

$$t_{Lk} = t_{L0} - \frac{1}{L_m} \sum_{i=1}^{n_s} L_{mi} (t_{L0} - t_{ai}). \quad (8)$$

Для расчета теплообмена в вихревой камере с дисковым распылителем запишем уравнение теплового баланса:

$$dQ = dQ_T + dQ_{исп}. \quad (9)$$

Количество теплоты, передаваемой теплопроводностью за время  $dt$

$$dQ_T = \pi a^2 \alpha_G (t_a - t_G) dt. \quad (10)$$

Количество теплоты, выделяющейся при испарении капли воды за время  $dt$

$$dQ_{исп} = rdM_a = \pi a^2 \beta_G (x - x^*) rd\tau, \quad (11)$$

где  $dM_a = \pi a^2 \beta_G (x - x^*) dt$  – масса воды, испарившейся с капли, кг.

Количество теплоты, выделяющейся при охлаждении капли воды от температуры  $t_a$  до температуры  $t_a - dt_a$

$$dQ = \frac{\pi a^3}{6} \rho_L c_L dt_a \quad (12)$$

С учетом уравнений (10)-(12) уравнение (9) принимает вид

$$-\frac{dt_a}{d\tau} = 6 \frac{\alpha_G(t_o - t_G) + \beta_G r(x - x^*)}{a \rho_L c_L} \quad (13)$$

Уравнение, характеризующее изменение диаметра капли во времени:

$$\frac{da}{d\tau} = -\frac{2\beta_G(x - x^*)}{\rho_L} \quad (14)$$

Полученная система из 8 дифференциальных уравнений позволяет определить температуру капель и их диаметр после контакта с воздухом

$$\begin{aligned} \frac{dU_r}{d\tau} &= \frac{U_\varphi^2}{r} + \frac{3\rho_G}{4\rho_L} c_a \frac{U_{om}}{a} (W_r - U_r), \\ \frac{dU_\varphi}{d\tau} &= -\frac{U_r U_\varphi}{r} + \frac{3\rho_G}{4\rho_L} c_a \frac{U_{om}}{a} (W_\varphi - U_\varphi), \\ \frac{dU_z}{d\tau} &= g + \frac{3\rho_G}{4\rho_L} c_a \frac{U_{om}}{a} (W_z - U_z), \\ \frac{dr}{d\tau} &= U_r, \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{U_\varphi}{r}, \quad \frac{dz}{d\tau} = U_z, \\ -\frac{dt_a}{d\tau} &= 6 \frac{\alpha_G(t_o - t_G) + \beta_G r(x - x^*)}{a \rho_L c_L}, \\ -\frac{da}{d\tau} &= \frac{2\beta_G(x - x^*)}{\rho_L} \end{aligned} \quad (15)$$

Система (15) решается со следующими граничными условиями  $U_r(0) = U_{r0}$ ,  $U_\varphi(0) = U_{\varphi0}$ ,  $U_z(0) = 0$ ,  $r(0) = R_d$ ,  $z(0) = 0$ ,  $t_a(0) = t_{L0}$ ,  $a(0) = a_0$ ,  $\varphi(0) = \pi/2$ .

Эффективность теплообмена в аппарате оценивалась соотношением:

$$\eta_{\text{оxt}} = \frac{t_{L0} - t_{Lk}}{t_{L0} - t_{Lp}} \quad (16)$$

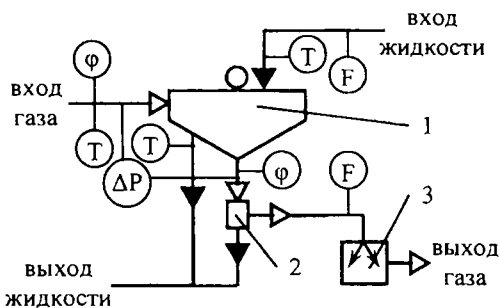


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – исследуемый аппарат, 2 – сепаратор, 3 – вакуум-насос

Для исследования характеристик работы вихревого аппарата с дисковым распылителем была спроектирована и построена экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 4. Основные размеры экспериментальной вихревой камеры: радиус рабочей зоны 0,2 м, радиус патрубка для выхода воздуха 0,035 м, высота лопаток 0,1 м, количество лопаток 24, угол наклона образующей днища на оси завихрителя 20°, высота распылителя 0,05 м, количество дисков распылителя 8,

минимальный диаметр распылителя 0,04 м, максимальный диаметр распылителя 0,05 м, степень крутки в аппарате 1.

Расход воздуха менялся в диапазоне от 0,5-3 кг/с, что позволяло создавать скорости на входе 3-20 м/с. Расход воды задавался исходя из соотношения  $L_m/G_m = 1-5$ . Отработанный воздух из аппарата выбрасывался за пределы помещения, в котором проводились экспериментальные исследования. Температура и относительная влажность воздуха на входе в аппарат измерялись гигрометром психрометрическим ВИТ-2. Температура воздуха на входе в аппарат поддерживалась на уровне 20°C, относительная влажность во время проведения эксперимента составляла 79%. Температура воды на входе и выходе из аппарата измерялась измерителем-регулятором двухканальным ОВЕН 2ТРМ1. Расход жидкости измерялся ротаметром, расход воздуха измерялся трубкой Пито-Прандтля, подключенной к многодиапазонному микроманометру ММН-2400. Вода диспергировалась в рабочую зону аппарата дисковым распылителем, число оборотов которого составляло 2900 об/мин. Температура воды поддерживалась на заданном уровне тэном и менялась в диапазоне 30-50°C.

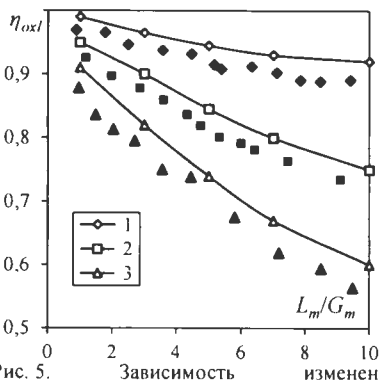


Рис. 5. Зависимость изменения эффективности теплообмена от отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз при скорости газа на входе в аппарат  $W_{вх}$ , м/с: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20; сплошная линия – расчет, точки – эксперимент

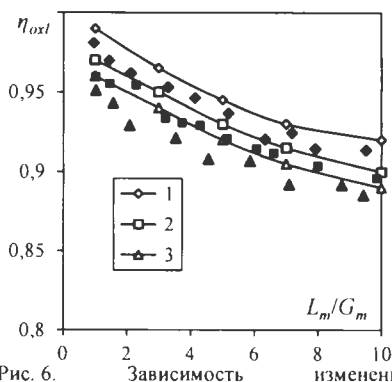


Рис. 6. Зависимость изменения эффективности теплообмена от отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз при начальной температуре жидкости  $t_{l,0}$ , °C: 1 – 50; 2 – 40; 3 – 30; сплошная линия – расчет, точки – эксперимент

Результаты исследований эффективности теплообмена показали удовлетворительную сходимость значений, полученных в результате решения по разработанному математическому описанию, с экспериментальными. С увеличением скорости воздуха на входе в аппарат происходит снижение эффективности теплообмена (рис. 5), это объясняется тем, что капли находятся меньше времени в рабочей зоне аппарата при одинаковых их объемах, время контакта уменьшается. Исследования показали, что эффективность теплообмена в вихревой камере падает с уменьшением расхода воздуха (рис. 5, 6), поскольку снижается тепловой поток. С ростом температуры воды на входе в аппарат, интенсивность испарения возрастает, при этом эффективность теплообмена увеличивается (рис. 6).

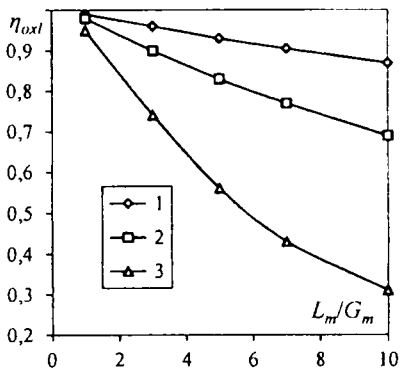


Рис. 7. Зависимость изменения эффективности теплообмена от отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз при различном радиусе аппарата  $R_0$ , м: 1 – 0,3; 2 – 0,5; 3 – 0,7

Эффективность снижается при увеличении радиуса рабочей зоны аппарата (рис. 7), т.к. из-за увеличения диаметра капель снижается удельная поверхность контакта фаз, однако при постоянном соотношении жидкой и газовой фаз изменение эффективности теплообмена незначительное.

В четвертой главе представлена разработанная инженерная методика расчета характерных параметров вихревой камеры с дисковым распылителем при различных нагрузках по воде и воздуху, выполнен анализ охладителей воды по эффективности, показана экономическая целесообразность охлаждения оборотной воды в установках с

вихревыми камерами. Инженерная методика расчета разработанного аппарата позволяет провести анализ процесса теплообмена при различных режимных и конструктивных параметрах с целью оптимизации процесса охлаждения оборотной воды промышленных предприятий, дать технико-экономическое обоснование внедрения предложенного аппарата. В ходе проверки инженерной методики расчета вихревой камеры с дисковым распылителем с научной установлено, что расхождение результатов составляет не более 15%. Результат сопоставления технико-экономических показателей современной градирни БМГ-100 и вихревой камеры с дисковым распылителем показал, что оценочные энергетические затраты на перекачивание воды могут быть снижены более чем в 6 раз. Стоимость передачи 1 ГДж тепла от воды воздуху может быть снижена на 23%. Таким образом, использование разработанного аппарата в строящихся и существующих производствах целесообразно.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа обзора существующих перспективных теплообменных аппаратов разработаны конструкции вихревых камер с разбрызгивающими устройствами, обладающие низким гидравлическим сопротивлением и высокой пропускной способностью. Предложенные конструкции приняты к внедрению на ООО «Татнефть-Пресскомпозит».
2. Разработаны и защищены патентами конструкции вихревых камер с разбрызгивающими устройствами, благодаря которым достигается равномерное заполнение рабочей зоны аппарата каплями воды.
3. Получены уравнения для определения геометрических размеров дискового распылителя с целью обеспечения равномерного распределения капель в объеме рабочей зоны вихревой камеры. Установлено, что минимальное количество дисков распылителя увеличивается с ростом высоты лопаток завихрителя, либо радиуса рабочей зоны аппарата.
4. Разработано математическое описание процесса охлаждения оборотной воды в вихревой камере с разбрызгивающими устройствами. Получены зависимости

эффективности теплообмена, показано, что эффективность теплообмена в вихревой камере снижается с уменьшением расхода воздуха. Отклонение экспериментальных данных от теоретических не более 10%.

5. Экспериментально исследован вихревой аппарат с дисковым распылителем, позволяющий увеличить относительный расход жидкости и расширить диапазон значений рабочих скоростей воздуха на входе в аппарат.

6. В результате экспериментальных и численных исследований получены зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз при различной скорости газа на входе в аппарат. С увеличением входной скорости газа в аппарат коэффициенты гидравлического сопротивления сухого и орошаемого аппарата возрастают.

7. Проведен анализ испарения воды в разработанном вихревом аппарате с дисковым распылителем. Исследования показали, что доля теплообмена испарением составляет от 40% до 90%.

#### **Основные обозначения:**

$\varphi, r, z$  – координаты капли в цилиндрической системе координат;  $\Delta z$  – высота прорези в распылителе, м;  $A$  – коэффициент крутки завихрителя вихревой камеры;  $a$  – диаметр капли, м;  $c_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления капли;  $c_L$  – удельная массовая теплоемкость воды, Дж/(кг·°C);  $D_n$  – диаметр патрубка для выхода воздуха, м;  $i$  – номер диска распылителя;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $G_m$  – массовый расход воздуха, кг/с;  $h$  – высота лопаток тангенциального завихрителя, м;  $L_m$  – массовый расход воды, кг/с;  $n_{a_i}$  – количество капель диаметром  $a$ , в рабочей зоне аппарата;  $n_d$  – число дисков распылителя;  $r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $R_n$  – радиус вихревой камеры, м;  $R_d$  – радиус диска распылителя, м;  $t_a$  – температура капли, °C;  $t_G$  – температура воздуха, °C;  $t_L$  – температура воды, °C;  $U_{om}$ ,  $U_\theta$ ,  $U_r$ ,  $U_z$  – относительная, тангенциальная, радиальная и осевая скорости капли, м/с;  $W_\theta$ ,  $W_r$ ,  $W_z$  – тангенциальная, радиальная и осевая скорости воздуха, м/с;  $W_{br}$  – скорость воздуха на входе в вихревую камеру, м/с;  $W_{r,R}$  – радиальная составляющая скорости газа у кромки лопаток завихрителя, м/с;  $x$  – влагосодержание воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $x'$  – влагосодержание воздуха в пограничном слое, т.е. при температуре поверхности воды и при полном насыщении воздуха водяными парами, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha_G$  – коэффициент теплоотдачи от капель к воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·K);  $\beta_G$  – коэффициент теплоотдачи от капель к воздуху, м/с;  $\varepsilon$  – степень затухания крутки потока газа;  $\eta_{ext}$  – эффективность теплообмена в вихревой камере;  $\nu_G$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $\xi_{br}$  – коэффициент гидравлического сопротивления аппарата;  $\rho_G$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_L$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau_{a_i}$  – время полета капель с  $i$ -того диска распылителя, с;  $\varphi$  – относительная влажность воздуха, %;  $\chi$  – угол наклона образующей конического днища к оси завихрителя, °.

Нижние индексы: 0 – начальное значение;  $a$  – капля;  $k$  – конечное значение;  $p$  – равновесное значение;  $r$  – проекция на радиус;  $z$  – проекция на ось аппарата;  $\varphi$  – тангенциальная составляющая;  $L$  – жидкая фаза;  $G$  – газовая фаза.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

##### **Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях по перечню ВАК**

1. Дмитриева (Макушева), О.С. Вихревая камера для очистки газовых выбросов промышленных предприятий / О.С. Дмитриева (Макушева), А.В. Дмитриев, Н.А. Николаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 6. – С. 12-13.

2. Дмитриев, А. В. Очистка газовых выбросов в вихревых камерах с разбрызгивающим устройством / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева (Макушева), А.Н. Николаев // Экология и промышленность России. – 2010. – № 10. – С. 15-17.
3. Дмитриева (Макушева), О. С. Контактные устройства с увеличенной пропускной способностью для тепломассообменных процессов / О.С. Дмитриева (Макушева), А.В. Дмитриев, А.Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 10. – С. 648-649.
4. Дмитриев, А. В. Перспективы использования аппаратов вихревого типа с винтами для охлаждения и нагрева газов / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева (Макушева), А.Н. Николаев // Промышленная энергетика. – 2011. – № 2. – С. 41-43.
5. Гумерова, Г. Х. Оптимизация размеров регулярной насадки для тепломассообменных процессов / Г.Х. Гумерова, О.С. Дмитриева (Макушева), А.В. Дмитриев // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – Т. 14. – № 3. – С. 35-37.
6. Дмитриева (Макушева), О. С. Контактные устройства для охлаждения оборотной воды промышленных предприятий / О.С. Дмитриева (Макушева), А.В. Дмитриев, А.Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – Т. 14. – № 3. – С. 153-154.
7. Дмитриева (Макушева), О. С. Использование разбрызгивающих устройств в вихревых камерах для охлаждения оборотной воды / О.С. Дмитриева (Макушева), А.В. Дмитриев // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – Т. 14. -- № 8. -- С. 337-339.
8. Дмитриева (Макушева), О. С. Оценка экономического эффекта от внедрения контактных устройств с увеличенной пропускной способностью / О.С. Дмитриева (Макушева), А.В. Дмитриев // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – Т. 14. – № 8. – С. 355-357.
9. Коньков, О. А. Диспергирование жидкости в полых вихревых аппаратах для очистки газовых выбросов / О.А. Коньков, О.С. Дмитриева (Макушева), А.В. Дмитриев // Экология и промышленность России. – 2011. – Июль. – С. 14-16.
10. Дмитриев, А. В. Охлаждение оборотной воды промышленных установок в вихревых камерах / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева (Макушева), Н.А. Николаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 7. – С. 19-22.
11. Дмитриев, А. В. Вихревые аппараты для очистки крупнотоннажных газовых выбросов промышленных предприятий / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева (Макушева), И.Р. Калимуллин, А.Н. Николаев // Экология и промышленность России. – 2012. – № 1. – С. 4-7.
12. Дмитриев, А. В. Повышение эффективности очистки газовых выбросов путем установки пневмогидравлических распылителей в аппараты с интенсивным взаимодействием фаз / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, А.Н. Николаев // Экология и промышленность России. – 2012. – № 5. – С. 16-18.
13. Дмитриева, О. С. Тепломассообменный аппарат с комбинированной схемой взаимодействия потоков газа и жидкости в системах оборотного водоснабжения / О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев, А.Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 11. – С. 146-148.
14. Дмитриев, А. В. Особенности охлаждения оборотной воды в вихревых камерах в зимний период / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, А.Н. Николаев // Экология и промышленность России. – 2012. – № 9. – С. 12-13.

15. Дмитриев, А. В. Перспективы использования вихревых камер для охлаждения оборотной воды промышленных установок / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, А.Н. Николаев // Промышленная энергетика. – 2012. – № 10. – С. 31-34.
16. Дмитриева, О. С. Разработка теплообменного устройства для контакта газа и жидкости в вихревом потоке для систем оборотного водоснабжения / О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев, А.Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 3. – С. 63-65.
17. Дмитриева, О. С. Охлаждение оборотной воды в вихревой камере с дисковым распылителем / О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 3. – С. 13-16.

#### Патенты

18. Пат. 87924 Российская Федерация. Вихревое устройство с двумя зонами контакта / Дмитриев А.В., Дмитриева (Макушева) О.С., Николаев Н.А. – № 2009122045/22; заявл. 08.06.2009; опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30. – 2 с.
19. Пат. 89000 Российская Федерация. Разбрызгивающее устройство / Дмитриева (Макушева) О.С., Дмитриев А.В., Николаев Н.А. – № 2009129889/22; заявл. 03.08.2009; опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33. – 2 с.
20. Пат. 96786 Российская Федерация. Контактное устройство для теплообменных процессов / Дмитриева (Макушева) О.С., Дмитриев А.В., Николаев А.Н. – № 2010115464/05; заявл. 19.04.2010; опубл. 20.08.2010, Бюл. № 23. – 2 с.
21. Пат. 99339 Российская Федерация. Распределитель жидкости для теплообменных аппаратов / Дмитриева (Макушева) О.С., Дмитриев А.В., Николаев А.Н. – № 2010121301/05; заявл. 25.05.2010; опубл. 20.11.2010, Бюл. № 32. – 2 с.
22. Пат. 102309 Российская Федерация. Разбрызгивающее устройство для аппаратов с интенсивным взаимодействием фаз / Коньков О.А., Дмитриева (Макушева) О.С., Дмитриев А.В., Николаев А.Н. – № 2010106576/22; заявл. 24.02.2010; опубл. 27.02.2011, Бюл. № 6. – 2 с.
23. Пат. 102984 Российская Федерация. Вихревой холодильно-нагревательный аппарат / Дмитриева (Макушева) О.С., Дмитриев А.В., Николаев А.Н. – № 2010121303/06; заявл. 25.05.2010; опубл. 20.03.2011, Бюл. № 8. – 2 с.
24. Пат. 115234 Российская Федерация. Устройство распределения газового потока для теплообменных аппаратов / Дмитриев А.В., Дмитриева (Макушева) О.С., Николаев А.Н. – № 2011113578/05; заявл. 07.04.2011; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12. – 2 с.
25. Пат. 2480699 Российская Федерация. Теплообменный аппарат с комбинированной схемой взаимодействия потоков газа и жидкости / Дмитриев А. В., Калимуллин И. Р., Дмитриева (Макушева) О. С., Николаев А. Н. – № 2011113640/04; заявл. 07.04.2011; опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12. – 5 с.
26. Пат. 127881 Российская Федерация. Теплообменное устройство для контакта газа и жидкости в вихревом потоке / Дмитриев А. В., Дмитриева О. С., Гумерова Г. Х., Николаев А. Н. – № 2012144822/06; заявл. 22.10.2012; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13. – 2 с.

#### Международные конференции

27. Дмитриева (Макушева), О. С. Определение оптимальных размеров вихревой камеры / О.С. Дмитриева (Макушева), А.В. Дмитриев, Н.А. Николаев // XI Международная конференция молодых ученых «Пищевые технологии и

биотехнологии» (13-16 апреля 2010 г., г. Казань). – Казань : Отечество, 2010. – С. 148.

28. Дмитриева (Макушева), О. С. Охлаждение оборотной воды в контактных устройствах вихревого типа / О.С. Дмитриева (Макушева), А.В. Дмитриев, А.Н. Николаев // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Проблемы безопасности и защиты населения и территорий от ЧС (Безопасность – 2011)» (15-17 февраля 2011 г., г. Уфа) : в 2 т. Т. 2. – Уфа : ГОУ ВПО УГАТУ, 2011. – С. 314-318.

29. Дмитриева, О. С. Перспективы использования вихревых камер в системах оборотного водоснабжения / О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев // Международная научно-практическая конференция «XL Неделя науки СПбГПУ» (5-10 декабря 2011 г., г. Санкт-Петербург). – СПб : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 272-273.

30. Дмитриева, О. С. Охлаждение оборотной воды в вихревых камерах с разбрызгивающими устройствами в зимний период / О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев // Международная научно-методическая конференция «Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – фундамент подготовки специалистов будущего» (27 апреля 2012 г., г. Салават). – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2012. – С. 232-236.

31. Дмитриева, О. С. Особенности охлаждения оборотной воды в вихревых камерах при отрицательных температурах воздуха / О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев, Н.А. Николаев // XXV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-25» (29-31 мая 2012 г., г. Волгоград). – Волгоград : Волгогр. гос. техн. ун-т, 2012. – С. 150-152.

**Прочие публикации**

32. Dmitrieva (Makusheva), O. S. Vortical chamber for cleaning gases emitted by industrial establishments / O.S. Dmitrieva (Makusheva), A.V. Dmitriev, N.A. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2010. – V. 46. – № 5-6. – P. 330-333.

33. Dmitriev, A. V. Contact mass exchanger to increase output of active tower units / A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva (Makusheva), K.V. Dmitrieva, A.N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2011. – V. 47. – № 5-6. – P. 319-323.

34. Dmitriev, A. V. Cooling of return water from industrial plants in vortex chambers / A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva (Makusheva), N.A. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2011. -- V. 47. – № 7-8. – P. 462-467.

Подписано в печать 9 июля 2013 г.

Форм. бум. 60X84 1/16 Печ. л. 1. Тираж 100. Заказ №33.

Отпечатано в редакционно-издательском отделе

НХТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ»

Республика Татарстан, г. Нижнекамск, 423570, ул. 30 лет Победы, д. 5а.