

0-770557

На правах рукописи

НУРТДИНОВ НИЯЗ МИНСАГИРОВИЧ

**УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ
В ЭКОНОМАЙЗЕРАХ ВИХРЕВОГО ТИПА**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань - 2008

Работа выполнена в Казанском государственном технологическом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Николаев Андрей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Золотоносов Яков Давидович

кандидат технических наук
Мингалева Гузель Рашидовна

Ведущая организация: ГУ "Центр энергосберегающих технологий
Республики Татарстан при Кабинете Министров РТ"

Защита диссертации состоится «4» июля 2008 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.080.06 при Казанском государственном технологическом университете по адресу: 420015, г. Казань, ул. К.Маркса, 68 (зал заседаний учёного совета), А-330.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Автореферат разослан «3» июня 2008 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



С.И. Поникаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Дымовые газы, выбрасываемые промышленными предприятиями в атмосферу, являются причиной больших потерь тепла. Кроме того, выбросы в атмосферу высокотемпературных газов оказывают отрицательное влияние на экологическую обстановку. В связи с этим утилизация тепла дымовых газов является одной из важных задач энергосбережения и рационального расходования тепловой энергии.

Для утилизации тепла газов в настоящее время используются аппараты (экономайзеры) как поверхностного типа, так и с непосредственным контактом газов с охлаждающей жидкостью. Последние обладают рядом преимуществ, таких как возможности создания большой поверхности контакта фаз, глубокого охлаждения газов с получением дополнительного тепла за счет конденсации содержащейся в дымовых газах влаги. Однако традиционное оборудование контактного типа (насадочное, барботажное и распылительное) допускает устойчивую работу при низких скоростях газовой фазы, обычно не превышающих 2 м/с, что при охлаждении больших объемов дымовых газов обуславливает большие габаритные размеры аппаратов, сложность их монтажа и транспортировки, снижение эффективности из-за неравномерности распределения фаз в их поперечном сечении.

Указанных проблем можно избежать при использовании многоступенчатых аппаратов вихревого типа, которые устойчиво работают при скоростях газа до 30 м/с, имеют малые габаритные размеры, невысокое гидравлическое сопротивление. Однако в настоящее время их применение в качестве экономайзеров для утилизации тепла дымовых газов и получения нагретой воды не получило распространение из-за отсутствия методов расчета.

Работа выполнялась в рамках гранта РФФИ "Исследование и моделирование гидродинамики и тепломассообмена в двухфазных и газожидкостных закрученных потоках" (проект № 05-08-50125, 2005-2007 гг.).

Цель работы и основные задачи исследования. Целью работы являлось теоретическое и экспериментальное исследование процесса нагрева жидкости охлаждающимся газом в многоступенчатых аппаратах с вихревыми контактными элементами, а также разработка на их основе метода расчета экономайзеров вихревого типа.

В непосредственные задачи исследования входило:

- Расчетное исследование движения капель испаряющейся жидкости в контактных элементах вихревых экономайзеров и определение времени пребывания капель в зоне контакта, их скоростей и траекторий.
- Разработка математической модели тепло- и массообмена в контактных элементах экономайзеров вихревого типа.
- Расчетное исследование закономерностей нагрева воды и охлаждения дымовых газов в контактных элементах вихревых экономайзеров.
- Экспериментальное исследование процесса нагрева воды в контактных элементах вихревого экономайзера и определение адекватности математической модели.

- Разработка метода определения эффективности контактной ступени многоэлементного вихревого аппарата при нагреве воды охлаждающимися дымовыми газами, а также методики расчета вихревых экономайзеров.

Научная новизна работы. В результате численного расчета движения капель в контактных элементах вихревых экономайзеров получены зависимости для определения средних величин времен пребывания капель в элементах, скорости капель относительно газа и коэффициентов "проскальзывания" капель относительно газа в осевом и окружном направлениях. Разработана математическая модель тепло- и массообмена в контактных элементах вихревых экономайзеров и получена зависимость для определения коэффициента теплоотдачи в каплях жидкости. В результате численного решения определены зависимости эффективностей охлаждения газа и нагрева жидкости в контактных элементах от соотношения нагрузок по газу и жидкости, начальных параметров газа и жидкости, размеров контактного элемента. Получены зависимости, связывающие степени нагрева и изменения объема жидкости в контактных элементах и на контактной ступени.

Достоверность полученных результатов диссертации подтверждается использованием общепринятых подходов к моделированию и методов экспериментального исследования тепло- и массообмена, а также хорошим совпадением полученных в работе расчетных и экспериментальных данных.

Практическое значение работы. Предложено использование многоступенчатого вихревого аппарата для контактного нагрева воды дымовыми газами и разработана методика расчета этих аппаратов. Предложены схемы технологической обвязки вихревых экономайзеров при получении нагретой воды для теплоснабжения и горячего водоснабжения и проведен анализ работы экономайзера при различных вариантах обвязки. Разработанные технические решения приняты к внедрению на ОАО "Таткрахмалпатока".

На защиту выносятся:

- результаты численного исследования движения капель в вихревом контактном элементе;
- математическая модель тепло- и массообмена в вихревом контактном элементе при контактном нагреве жидкости газом;
- зависимость для определения коэффициента теплоотдачи в каплях жидкости;
- результаты численного исследования эффективности контактных элементов вихревых экономайзеров при контактном нагреве жидкости газом;
- метод определения конечных параметров нагреваемой жидкости на контактных ступенях экономайзеров.

Личное участие. Все результаты работы получены лично автором под руководством д.т.н., профессора А.Н. Николаева.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных и общероссийских конференциях, в том числе: на Национальной конференции по теплоэнергетике НКТЭ-2006 (Казань, 2006); XX Международной научной конференции "Математические методы в технике и технологиях" (Ярославль, 2007); Общероссийской конференции молодых ученых с меж-

им. Н. И. ЛЮБАЧЕВСКОГО
КАЗАНСКОГО ГОС. УНИВЕРСИТЕТА

дународным участием "Пищевые технологии" (Казань, 2006); VIII Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием "Пищевые технологии" (Казань, 2007); Международной научной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам "Научному прогрессу – творчество молодых" (Йошкар-Ола, 2008).

Публикация работы. По теме диссертационной работы опубликовано 3 научные статьи и доклада в периодических научных изданиях и трудах конференций, 2 депонированные работы, а также 4 тезиса докладов в материалах конференций.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, содержащих основные результаты исследования, выводов по работе и списка литературы, составляющего 138 источников. Работа изложена на 118 страницах, содержит 38 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана необходимость утилизации тепла дымовых газов промышленных предприятий, а также актуальность применения для этих целей оборудования, обладающего высокой пропускной способностью по газу, определены цель и основные задачи исследования.

В первой главе приведена характеристика дымовых газов предприятий теплоэнергетики, черной и цветной металлургии и других отраслей промышленности, представлен сравнительный анализ конструкций аппаратов и устройств для охлаждения высокотемпературных газов и утилизации их теплоты с непосредственным контактом нагреваемой жидкости и охлаждаемых газов.

Анализ показал, что наиболее перспективными аппаратами для решения указанных задач являются многоступенчатые аппараты вихревого типа.

Многоступенчатые вихревые аппараты представляют собой теплообменную колонну с контактными ступенями. Контактная ступень многоэлементных аппаратов выполняется в виде тарелки с закрепленными на ней прямоточно-вихревыми элементами одинакового размера. Внутри каждого элемента осуществляется прямоточное взаимодействие фаз, тогда как в целом по колонне движение фаз происходит в режиме противотока.

Анализ вариантов конструктивного оформления таких аппаратов выявил предпочтительность применения в многоступенчатых аппаратах контактных элементов с тангенциально-лопаточными завихрителями газа (рис.1).

Поток газа, поступающий снизу в контактные устройства, приобретает за счет завихрителя 2 вращательно-поступательное (вихревое) движение.

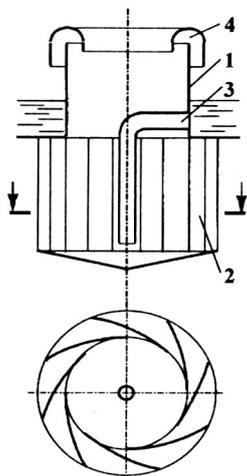


Рис.1. Прямоточно-вихревой контактный элемент.

Жидкость, подаваемая в центральную зону завихрителя по трубке 3, дробится потоком газа на капли, вовлекаемые им в совместное движение. Под действием центробежной силы капли перемещаются к лопаткам завихрителя, где образуется вращающийся капельный слой. Капли в слое многократно осаждаются на лопатки, образуя жидкую пленку, которая срывается с лопаток, вновь образуя капли жидкости. При выходе из зоны завихрителя капли жидкости оседают на стенке патрубка 1, образуя пленку, которая на выходе из контактного устройства отделяется от потока газа сепарационным устройством 4. Контактные элементы работают при высоких скоростях газа (до 40 м/с).

Во второй главе представлены результаты изучения закономерностей течения газа и движения одиночных капель жидкости в контактных элементах вихревых экономайзеров.

Представлен обзор имеющихся литературных данных в области закрученных двухфазных газожидкостных течений. Было признано целесообразным заменить математическое моделирование закрученного течения газа в вихревых элементах его описанием. При описании экспериментальных данных использованы не отвлеченные способы аппроксимации, а аналитические зависимости для параметров вихревого потока, полученные при решении наиболее простых математических моделей и поэтому уже отражающие в той или иной степени закономерности таких потоков. При расчете движения одиночных капель в капельном слое вблизи лопаток тангенциально-лопаточного завихрителя с достаточной степенью точности могут быть использованы приближенные зависимости:

$$W_{\varphi} = \frac{W_{\varphi R} R}{r}; \quad W_z = \frac{G}{\rho_r \pi R^2} = const; \quad W_r = \frac{W_{rR} R}{r}. \quad (1)$$

На основании анализа сил, действующих на капли в закрученном потоке газа, можно сделать вывод о том, что существенное влияние на движение капель оказывают сила аэродинамического сопротивления, сила тяжести, сила Кориолиса и центробежная сила, с учетом которых система уравнений движения одиночной капли в вихревом контактном элементе в цилиндрической системе координат запишется в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dU_r}{d\tau} &= \frac{U_{\varphi}^2}{r} + \frac{\rho_r}{\rho_{ж}} \frac{3}{4} c_a \frac{U_{отн}}{a_{ж}} (W_r - U_r); & \frac{dU_{\varphi}}{d\tau} &= -\frac{U_{\varphi} U_r}{r} + \frac{\rho_r}{\rho_{ж}} \frac{3}{4} c_a \frac{U_{отн}}{a_{ж}} (W_{\varphi} - U_{\varphi}); \\ \frac{dU_z}{d\tau} &= -g + \frac{\rho_r}{\rho_{ж}} \frac{3}{4} c_a \frac{U_{отн}}{a_{ж}} (W_z - U_z); & \frac{dr}{d\tau} &= U_r; & \frac{d\varphi}{d\tau} &= \frac{U_{\varphi}}{r}; & \frac{dz}{d\tau} &= U_z; \end{aligned} \quad (2)$$

где $U_{отн} = \sqrt{(W_r - U_r)^2 + (W_{\varphi} - U_{\varphi})^2 + (W_z - U_z)^2}$.

Движение испаряющейся капли в цилиндрической системе координат можно описать системой уравнений, аналогичной (2), где в числе активных сил должна быть учтена реактивная сила Мещерского, вызванная различием интенсивности испарения жидкости вдоль поверхности капли и рассчитываемая по зависимости:

$$F_M = \pm \left| \xi_p U_{отн} \frac{dm_k}{d\tau} \right|. \quad (3)$$

В процессе своего движения капля испаряется и ее диаметр уменьшается. Поэтому система уравнений (2), описывающая движение одиночной капли, должна быть дополнена уравнением массоотдачи:

$$dm_k = \beta_y F_k (y^* - y) d\tau, \quad (4)$$

Выразив m_k через диаметр капли, выражение (4) можно представить в виде:

$$\frac{da_k}{d\tau} = 2 \frac{\beta_y}{\rho_{ж}} (y^* - y). \quad (5)$$

Физические свойства парогазовой смеси, обтекающей каплю, можно принять при средней температуре теплового пограничного слоя вокруг капли t_m и средней концентрации водяного пара в диффузионном пограничном слое y_m :

$$t_m = (t + t^*)/2, \quad y_m = (y + y^*)/2. \quad (6)$$

В общем случае температура на поверхности испаряющейся капли может быть определена из соотношения:

$$\alpha(t - t^*) = \beta_y h^* (y^* - y) + \lambda_{ж} \left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=a/2}. \quad (7)$$

Входящие в выражения (5) и (7) коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи можно определить из уравнения Фреслинга:

$$Nu = 2 + b Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad Sh = 2 + b Re^{1/2} Sc^{1/3}. \quad (8)$$

Предварительные расчеты траекторий капель в контактных элементах, проведенные для системы воздух – вода, показали слабое влияние испарения капель на их скорости и траектории. Это связано с малым временем существования капель в контактном элементе и, соответственно, с малой степенью изменения их диаметра.

После подстановки $\beta_y = Sh \cdot D_r / a_k$ в (5), разделения переменных и интегрирования можно получить зависимость для относительного изменения диаметра капель в контактном элементе:

$$\frac{\Delta a_k}{a_{кн}} = 1 - \frac{a_{кк}}{a_{кн}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{4Sh_{cp} D_r (y^*_{cp} - y)\tau}{a_{кн}^2 \rho_{ж}}} = 1 - \sqrt{1 - C}, \quad (9)$$

где $C = \frac{4Sh_{cp} D_r (y^*_{cp} - y)\tau}{a_{кн}^2 \rho_{ж}}$. Расчеты показали, что для капель с начальным

диаметром менее 0,1 мм значение C даже при высоких значениях температур не превышает 0,1. В этом случае максимальное изменение диаметра капель за время их движения в контактном элементе составляет около 5%, что позволяет пренебречь влиянием испарения при исследовании траекторий и скоростей капель в контактных элементах вихревых аппаратов.

При численном исследовании траекторий и скоростей капель в контактных элементах вихревых аппаратов использовалась система уравнений (2), которая приводилась к безразмерному виду. В качестве масштаба скорости при-

нята скорость газа в щелях тангенциального завихрителя ($W_{вх}$), а в качестве масштаба длины – внутренний радиус контактного элемента (R).

С учетом выражений для описания компонент скорости газа (1) система уравнений (2) в безразмерном виде принимает вид:

$$\frac{dU'_r}{dt'} = \frac{U'^2_{\phi}}{r'} + \frac{\rho_r}{\rho_{ж}} \frac{3}{4} c_a \frac{U'_{отн}}{a'} \left(-\frac{1}{Kr'} - U'_r \right); \quad \frac{dU'_{\phi}}{dt'} = -\frac{U'_{\phi} U'_r}{r'} + \frac{\rho_r}{\rho_{ж}} \frac{3}{4} c_a \frac{U'_{отн}}{a'} \left(\frac{\varepsilon}{r'} - U'_{\phi} \right);$$

$$\frac{dU'_z}{dt'} = -\frac{1}{Fr} + \frac{\rho_r}{\rho_{ж}} \frac{3}{4} c_a \frac{U'_{отн}}{a'} \left(\frac{2h'}{K} - U'_z \right); \quad \frac{dr'}{dt'} = U'_r; \quad \frac{d\varphi}{dt'} = \frac{U'_{\phi}}{r'}; \quad \frac{dz'}{dt'} = U'_z. \quad (10)$$

Здесь $Fr = W_{вх}^2 / gR$ – аналог критерия Фруда; $\varepsilon = W_{\phi R} / W_{вх} = 1 / (1 + 1,58L_m / G_m)$

– коэффициент изменения тангенциальной скорости на входе;

$K = W_{вх} / W_{rR} = 2AH'$; $A = W_{вх} / W_{ср}$ – коэффициент крутки завихрителя. Для определения коэффициента сопротивления использовалась формула Клячко:

$$c_a = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{1/3}}. \quad (11)$$

Расчеты проводились методом Рунге-Кутты с начальными условиями:

$$t' = 0; \quad r' = 1; \quad \varphi = 0; \quad z' = 0; \quad U'_r = 0; \quad U'_{\phi} = 0; \quad U'_z = 0. \quad (12)$$

В расчетах изменялись значения $K, a', h', Fr, \varepsilon, v'$ и соотношение плотностей газа и жидкости $\bar{\rho}$. В результате расчетов определялись траектории и компоненты скорости капель, а также времена существования капель в контактном элементе, средние по времени коэффициенты проскальзывания капель в продольном и окружном направлениях, $\chi_{\phi} = U_{\phi} / W_{\phi}$; $\chi_z = U_z / W_z$ и безразмерная относительная скорость капель относительно газа, $U'_{отн}$.

Расчеты траекторий капель показали, что форма и длина траектории капль слабо зависит от всех изменяемых параметров, кроме параметра K и соотношения массовых расходов жидкости и газа. С увеличением K уменьшаются длина и относительное время пролета капль (рис.2а). С увеличением соотношения массовых расходов, наоборот, указанные параметры увеличиваются (рис.2б). Длина перемещения капль в продольном направлении зависит от всех изменяемых параметров, причем наибольшее влияние оказывают параметр K , безразмерный диаметр капль, число Фруда и безразмерное расстояние от нижнего торца завихрителя. На рис.3 в качестве примеров показаны смещения капль в осевом направлении при различных значениях K и Fr . При уменьшении K длина осевого смещения капль значительно увеличивается и при $K=2$ становится близкой по значению радиусу контактного элемента, что отрицательно сказывается на эффективности контактных устройств из-за снижения времени пребывания в них жидкой фазы. В связи с этим при проектировании и расчете контактных устройств значения параметра K должны выбираться не ниже 5.

При уменьшении числа Фруда до некоторого предельного значения капли начинают двигаться в противоположном направлении. Аналогичный эффект наблюдается при уменьшении относительной плотности, безразмерной кинематической вязкости и увеличении безразмерного диаметра капль. Предельные

значения этих параметров соответствуют границе устойчивой работы контактных элементов.

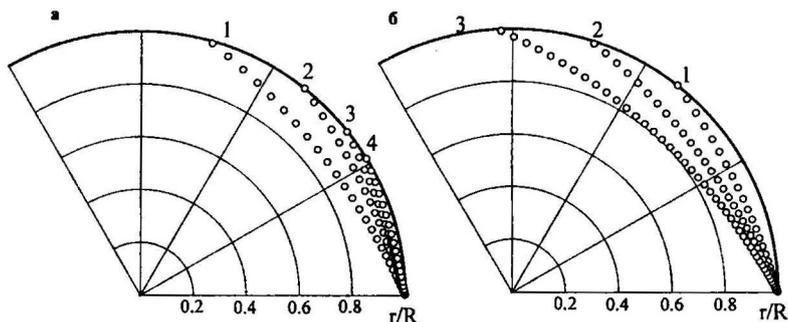


Рис.2. Проекция траекторий капель на поперечное сечение контактного элемента. $a' = 0,01$; $h' = 0,5$; $Fr = 400$; $v' = 0,00005$; $\bar{\rho} = 0,00075$, $\Delta\tau' = 0,4$. а) $L_m/G_m = 0,5$; K : 1 - 4; 2 - 6; 3 - 8; 4 - 10. б) $K = 6$; L_m/G_m : 1 - 0,5; 2 - 1; 3 - 1,5.

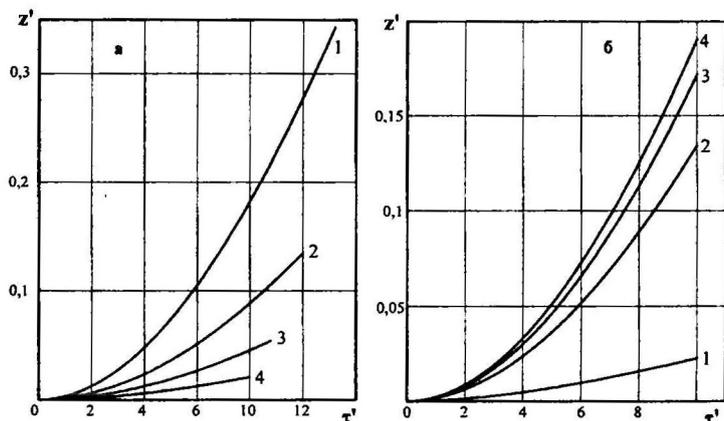


Рис.3. Безразмерные смещения капель в осевом направлении при движении в контактом элементе.

$L_m/G_m = 0,5$; $h' = 0,5$; $v' = 0,00005$; $\bar{\rho} = 0,00075$. а) $Fr = 400$; $a' = 0,01$; K : 1 - 4; 2 - 6; 3 - 8; 4 - 10. б) $K = 6$; $a' = 0,01$; Fr : 1 - 200; 2 - 400; 3 - 600; 4 - 800.

В результате обработки результатов расчетов получены аппроксимационные зависимости для определения времен пребывания капель жидкости в контактом элементе, средних по времени значений безразмерной относительной скорости капель и коэффициентов проскальзывания капель в окружном и осевом направлениях.

$$\tau' = 2,652 \frac{a'^{0,624} (L_m/G_m)^{0,6}}{K^{0,38} v'^{0,2} \bar{\rho}^{-0,461}}, \quad (13)$$

$$\chi_\phi = 3,974 \frac{(L_m/G_m)^{1/3} v'^{0,224} \bar{\rho}^{-0,46}}{K^{0,41} a'^{0,7}}, \quad (14)$$

$$\chi_z = 3081,4 \frac{K^{1,114} h^{0,9} (L_m/G_m)^{0,115}}{e^{0,427K+0,457h'}} \left(\frac{0,5}{a^{0,17}} - 1 \right) \left(\frac{0,5Fr^{0,14}}{e^{0,162 \cdot 10^{-3} Fr}} - 1 \right) \times \quad (15)$$

$$\times (0,0858 \cdot \ln v' + 1) (0,125 \cdot \ln \bar{p} + 1),$$

$$U'_{отн} = \frac{a' e^{0,212h'}}{K^{0,175} (L_m/G_m)^{0,388} (1,737a' + 0,00222)}. \quad (16)$$

Приравняв выражения в скобках в уравнении (16) нулю, можно определить условия "захлебывания" элемента.

Третья глава посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию тепло- и массообмена в вихревых контактных элементах и на контактных ступенях вихревого экономайзера.

Исследования структуры потоков во внутренней области тангенциально-лопаточного завихрителя показали, что основная масса распыленной жидкости

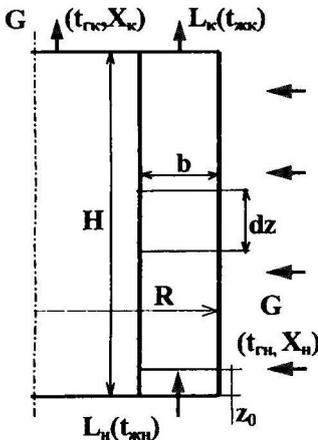


Рис.4. Схема потоков в тангенциально-лопаточном завихрителе.

движется в непосредственной близости от лопаток, образуя вращающийся капельный слой. Благодаря тому что толщина капельного слоя мала по сравнению с высотой завихрителя, перемешиванием газа и жидкой фазы по высоте капельного слоя можно пренебречь, а в поперечном сечении капельного слоя принять полное смешение газа и жидкости. Выделим в капельном слое (рис.4) кольцевой элемент высотой dz и с поперечным сечением, равным поперечному сечению слоя, и введем безразмерную координату $\xi = z/H$.

Баланс массы для выделенного объема капельного слоя

$$dG \cdot X_n + L = dG \cdot X_b + (L + dL) \text{ или}$$

$$\frac{dL}{d\xi} = Gf(\xi)(X_n - X_b) \quad (17)$$

где $dG = Gf(\xi)d\xi$, $f(\xi)$ – функция расхода газа по высоте завихрителя.

Тепловой баланс для выделенного элемента капельного слоя:

$$dG(i_{гн} + X_n i_{пн}) + Lc_{ж}t_{ж} = dG(i_{гб} + X_b i_{пб}) + (L + dL)c_{ж}(t_{ж} + dt_{ж}). \quad (18)$$

Подставив в (18) выражение (17) и выразив энтальпии через температуры и теплоемкости, получим:

$$\frac{dt_{ж}}{d\xi} = \frac{G}{L} \frac{f(\xi)}{c_{ж}} [t_n(c_r + X_n c_n) - t_b(c_r + X_b c_n) + (X_n - X_b)(h_0 - c_{ж}t_{ж})]. \quad (19)$$

Система уравнений (17) и (19) представляет собой задачу Коши с начальными условиями $\xi = \xi_0$; $L=L_n$; $t_{ж} = t_{жн}$ и может быть решена численно. Результатом решения являются расход, температура жидкости на выходе из контактного элемента. На каждом шаге решения необходимо определять влагосо-

держание и температуру газа на выходе из капельного слоя по кинетическим уравнениям тепло- и массообмена.

Уравнение массоотдачи для выделенного объема можно записать в виде:

$$dG(X_n - X_b) = \beta(y_b - y^*)dF. \quad (20)$$

Связь между массовым влагосодержанием и концентрацией описывается выражениями:

$$X = \frac{\rho_n}{\rho_r} \frac{y}{\rho_n - y} \quad \text{и} \quad y = \frac{X\rho_n}{\rho_n / \rho_r + X}. \quad (21)$$

Поверхность контакта фаз в выделенном элементе слоя может быть определена по соотношению

$$dF = 6dm / a_k \rho_{ж}. \quad (22)$$

В качестве среднего диаметра капель может быть использован средний диаметр Заутера a_{32} . Масса находящихся в элементе слоя капель может быть выражена

$$dm = Ldt, \quad (23)$$

где $dt = dz / U_z$ – время пребывания капель в выделенном объеме. Осевую компоненту скорости капель U_z можно представить как произведение осевой компоненты скорости газа W_z и коэффициента проскальзывания капель χ_z , $U_z = \chi_z W_z$. Осевая компонента скорости газа приближенно равна:

$$W_z = \frac{Gg(\xi)}{\pi R^2} \left(\frac{\bar{M} + X_b}{\rho_n} \right). \quad (24)$$

С учетом последних выражений поверхность контакта, сосредоточенную в элементарном объеме, можно представить как:

$$dF = \frac{6H\pi R^2 d\xi}{\chi_z a_k g(\xi) (\bar{M} + X_b)} \frac{L \rho_n}{G \rho_{ж}}. \quad (25)$$

Теплообмен жидкости с газом в выделенном элементе объема можно описать выражением

$$Lc_{ж} dt_{ж} = q \cdot dF. \quad (26)$$

Структура потока жидкости в контактном элементе делает возможным использование для описания переноса тепла внутри капель пенетрационной модели, согласно которой жидкость внутри капель испытывает полное перемешивание через определенные промежутки времени τ , а между актами мгновенного полного перемешивания перенос тепла в каплях осуществляется молекулярной теплопроводностью. В этом случае теплообмен со стороны жидкой фазы удобно описывать средним фиктивным коэффициентом теплоотдачи $\bar{\alpha}_{ж} = F(\tau)$, где τ – характерное время существования отдельных капель в слое, определяемое в результате решения уравнений движения одиночной капли в закрученном потоке.

Подставив (26) в (18), получим:

$$dG [t_n(c_r + X_n c_n) - t_b(c_r + X_b c_n) + (X_n - X_b)(h_0 - c_{ж} t_{ж})] = \bar{\alpha}_{ж} (t^* - t_{ж}) dF. \quad (27)$$

Тепло, подводимое к поверхности капель со стороны парогазового потока, затрачивается на испарение жидкости и ее нагрев. Условие теплового равновесия на поверхности капель можно записать как:

$$\alpha_r(t_b - t^*) = \bar{\alpha}_ж(t^* - t_ж) + \beta \cdot h^*(y^* - y_b). \quad (28)$$

Преобразование выражений (20), (27) и (28) позволило получить систему алгебраических уравнений для определения локальных по высоте завихрителя значений температуры и влагосодержания на выходе из капельного слоя, а также температуры на поверхности раздела фаз.

$$X_b = X_n - \frac{\beta(y_b - y^*)}{Gf(\xi)} \frac{L \rho_n}{G \rho_ж \chi_z a_k g(\xi) (M + X_b)}, \quad (29)$$

$$t_b = \frac{\frac{\alpha_ж(t_ж - t^*)}{Gf(\xi)g(\xi)\chi_z} \frac{L \rho_n}{G \rho_ж a_k (M + X_b)} + t_n(c_r + X_n c_n) + (X_n - X_b)(h_0 - c_ж t_ж)}{c_r + X_b c_n}, \quad (30)$$

$$t^* = \frac{\alpha_r t_b + \bar{\alpha}_ж t_ж - \beta \cdot h^*(y^* - y_b)}{\alpha_r + \bar{\alpha}_ж}. \quad (31)$$

Система уравнений должна быть дополнена выражениями, связывающими концентрацию пара в газе с влагосодержанием:

$$y_b = \frac{X_b \rho_{nb}}{M + X_b}; \quad y^* = \frac{X^* \rho_n^*}{M + X^*}, \quad (32)$$

а также равновесным соотношением $X^* = f(t^*)$ или $y^* = f(t^*)$, которое находится на основании справочных или экспериментальных данных. Система алгебраических уравнений (29)–(32) решается итерационным методом на каждом шаге численного решения уравнений (17) и (19).

Входящий в уравнение (31) коэффициент теплоотдачи в капле определялся численно. Капли,двигающиеся в капельном слое при значениях критерия Рейнольдса менее 1000, имеют форму близкую к сферической, а циркуляция жидкости в них отсутствует. Это позволяет описывать теплообмен в каплях как нестационарную теплопроводность в сферическом теле. Задача нестационарной теплопроводности в каплях решалась численно методом сеток. Нестационарная теплопроводность в сфере описывалась известным уравнением:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right). \quad (33)$$

Решение искалось в виде зависимости безразмерной избыточной температуры, осредненной по объему капли, $\bar{\theta}_{cp}$ от критериев Фурье Fo и Био Bi . Однако предварительные расчеты показали слабую зависимость безразмерной избыточной температуры от критерия Био в исследуемом диапазоне параметров, и дальнейшие расчеты проводились при граничных условиях:

$$\tau = 0, \quad t = t_n; \quad r = a_k / 2, \quad t = t_{tp}; \quad r = 0, \quad \partial t / \partial r = 0, \quad (34)$$

а решение искалось в виде $\bar{\theta}_{cp} = f(Fo)$. Осредненная по объему капли температура определялась по формуле:

$$\bar{t}_{cp} = \int_0^{a_k/2} \frac{3r^2 t}{(a_k/2)^2} dr. \quad (35)$$

Полученная в результате численных расчетов зависимость описана выражением

$$\bar{\theta}_{cp} = \exp(-5,83Fo^{0,6}). \quad (36)$$

Теплообмен внутри одиночной капли можно описать соотношением:

$$dQ = \frac{\pi a_k^3}{6} \rho_{ж} c_p dt = \alpha_{ж} \pi a_k^2 (t_{гр} - t_{cp}) dt \quad (37)$$

После разделения переменных и интегрирования получим:

$$-\ln(\bar{\theta}_{cp}) = \frac{6}{a_k} \bar{\alpha}_{ж} \frac{\tau}{\rho_{ж} c_p}. \quad (38)$$

После подстановки выражения (36) в уравнение (38) получим выражение для среднего фиктивного коэффициента теплоотдачи:

$$\bar{\alpha}_{ж} = 0,972 \rho_{ж} c_p a_k Fo^{0,6} / \tau \quad \text{или} \quad Nu_{ж} = \frac{3,89}{Fo^{0,4}}. \quad (39)$$

Входящее в выражение (39) τ составляет время движения капле после срыва с одной лопатки завихрителя до осаждения на другую лопатку, определяемое по зависимости (13).

Численное решение задачи тепло- и массообмена в контактном элементе вихревого экономайзера проводилось четырехшаговым методом Рунге-Кутты, который применялся к системе уравнений (17) и (19) с граничными условиями $\xi = \xi_0$; $L = L_n$; $t_{ж} = t_{жн}$. На каждом шаге решения определялись значения температуры на поверхности капле, влагосодержания и температуры газа на выходе их капельного слоя по выражениям (29–31).

Эффективности нагрева воды и охлаждения газа определялись как

$$E_{ж} = \frac{t_{жк} - t_{жн}}{t_{мс} - t_{жн}}, \quad E_{г} = \frac{t_{гн} - t_{гк}}{t_{гн} - t_{мк}}, \quad (40)$$

где $t_{мк}$, $t_{мс}$ – температуры мокрого термометра, соответствующие условиям газа на выходе из контактного элемента и на верхнем срезе капельного слоя.

Как показали расчеты, эффективность нагрева жидкости в контактном элементе уменьшается с возрастанием соотношения массовых расходов жидкости и газа (рис.5). При более высоких температурах газа на входе в контактный элемент достигаются более высокие эффективности прогрева жидкости. К возрастанию эффективности приводит также увеличение массового влагосодержания в газе на входе, что связано с уменьшением затрат тепла, получаемого от газа, на испарение жидкости и увеличением затрат тепла на нагрев жидкости.

Эффективность охлаждения газа в контактном элементе, наоборот, увеличивается с возрастанием L/G (рис.6). С увеличением температуры газа эффективность охлаждения увеличивается неравномерно. Так, при увеличении температуры с 100 до 250°C происходит незначительный рост эффективности, тогда как при дальнейшем увеличении температуры до 500°C эффективность увеличивается почти в 1,5 раза.

Наряду с эффективностями $E_{ж}$ и $E_{г}$ в расчетах определялись степень нагрева жидкости, $\psi = t_{жк} / t_{жн}$ и степень изменения расхода жидкости, $\eta = L_{жк} / L_{жн}$ в контактном элементе. Зависимости для степени нагрева жидко-

сти качественно идентичны зависимостям для соответствующей эффективности. Расчеты показали, что степень изменения расхода жидкости η в большинстве случаев мало отличается от 1. Максимальное снижение расхода, наблюдаемое при высоких температурах газа 500°C , составляет $\eta=0,91$. Незначительные изменения расхода жидкости в контактных элементах связаны с малой степенью испарения жидкости в элементах, что вызвано в свою очередь малыми временами пребывания жидкости в элементе.

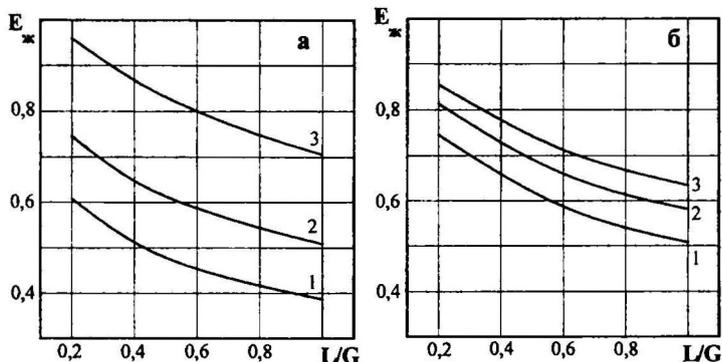


Рис.5. Зависимость эффективности нагрева жидкости в контактном элементе от соотношения массовых расходов жидкости и газа.

$A = 1$; $d_{\text{эл}} = 0,08 \text{ м}$; $H/d = 1$; $W_{\text{вх}} = 20 \text{ м/с}$; $\xi_0 = 0,2$; $t_{\text{жн}} = 30^{\circ}\text{C}$.

а) $X_{\text{н}} = 0,1 \text{ кг/кг}$; $t_{\text{гр}}$, $^{\circ}\text{C}$: 1 – 100; 2 – 250; 3 – 500. б) $t_{\text{гр}} = 250^{\circ}\text{C}$; $X_{\text{н}}$, кг/кг: 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3.

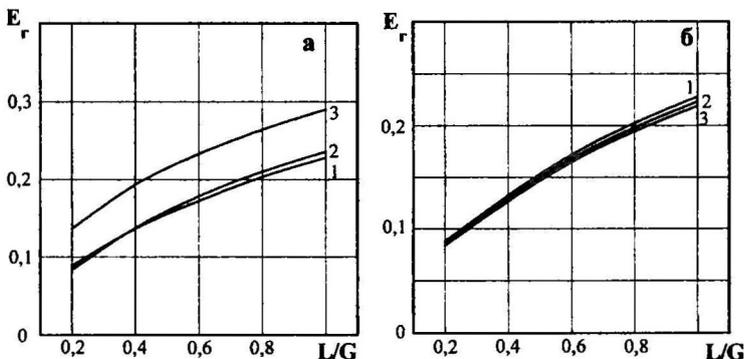


Рис.6. Зависимость эффективности охлаждения газа в контактном элементе от соотношения массовых расходов жидкости и газа.

$A = 1$; $d_{\text{эл}} = 0,08 \text{ м}$; $H/d = 1$; $W_{\text{вх}} = 20 \text{ м/с}$; $\xi_0 = 0,2$; $t_{\text{жн}} = 30^{\circ}\text{C}$.

а) $X_{\text{н}} = 0,1 \text{ кг/кг}$; $t_{\text{гр}}$, $^{\circ}\text{C}$: 1 – 100; 2 – 250; 3 – 500. б) $t_{\text{гр}} = 250^{\circ}\text{C}$; $X_{\text{н}}$, кг/кг: 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3.

С целью определения адекватности математической модели тепло- и массообмена в вихревом контактном элементе была проведена серия опытов. Исследования проводились на модели вихревого экономайзера с одним вихревым элементом с внутренним диаметром 80 мм, высотой тангенциально-лопаточного завихрителя 85 мм и коэффициентом крутки $A=1$. Схема экспериментальной установки представлена на рис.7.

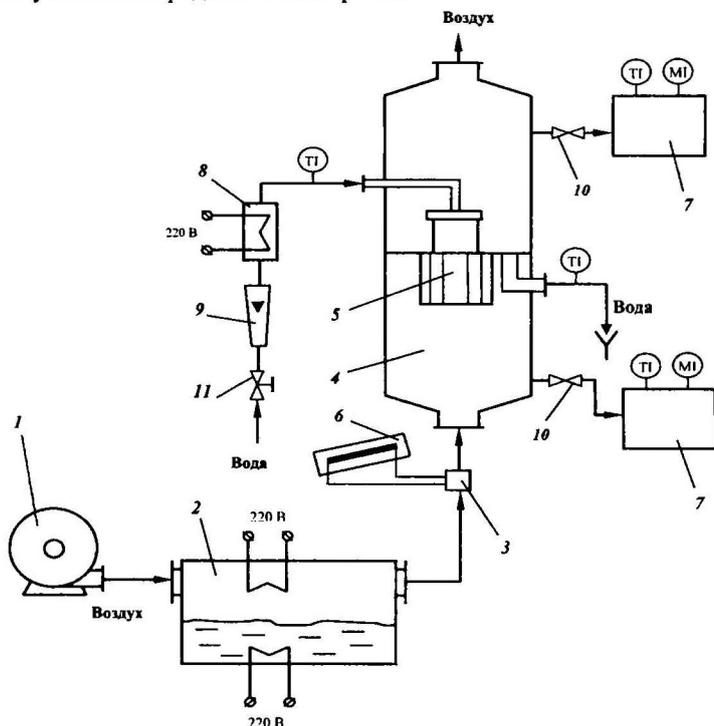


Рис. 7. Схема экспериментальной установки:

1 – вентилятор; 2–калорифер; 3–трубка Пито-Прандтля; 4–рабочий участок; 5–вихревой контактный элемент; 6–наклонный дифференциальный манометр; 7–расширительный бак; 8–нагреватель воды; 9–ротаметр; 10–заслонки; 11–вентиль.

Опыты проводились на системе воздух – вода. В опытах измерялись температура воды до и после контактного элемента, температура и влажность воздуха до и после контактного элемента. Влажность воздуха определялась по температурам сухого и мокрого термометра. Для измерения всех температур использовались портативные измерители температуры ИТ-17-К с разрешающей способностью измерения $0,1^{\circ}\text{C}$.

Сопоставление опытных и расчетных значений температур воздуха и воды и влагосодержания воздуха на выходе из контактного элемента показало их

хорошее совпадение. Среднеквадратические отклонения опытных и расчетных параметров не превышают 0,02.

При работе контактных ступеней без рециркуляции жидкости (рис.8а) вся жидкость, подаваемая на ступень, однократно проходит через контактные устройства и, после взаимодействия с газом, отводится на нижележащую ступень. В этом случае начальные параметры жидкости на входе в контактные устройства равны параметрам жидкости, поступающей на ступень, а конечные параметры жидкости на выходе из контактных устройств, равны параметрам жидкости, покидающей контактную ступень. Таким образом, эффективности контактных устройств и контактной ступени при отсутствии рециркуляции жидкости на ступени равны между собой:

$$E'_r = E_r, E'_{ж} = E_{ж}, \eta' = \eta, \psi' = \psi. \quad (41)$$

Здесь штрихами отмечены параметры, относящиеся к контактной ступени.

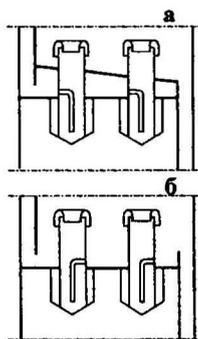


Рис.8. Типовые конструкции контактных ступеней: а) без рециркуляции жидкости; б) с рециркуляцией жидкости.

При работе контактных ступеней с рециркуляцией жидкости (рис.8б) прошедшая через контактные устройства жидкость вновь попадает на ступень, смешиваясь со свежей жидкостью, поступающей с вышележащей контактной ступени. В аппаратах небольшого диаметра, где число контактных устройств невелико, можно принять полное перемешивание жидкости на ступени, так что начальные параметры жидкости, поступающей в контактные устройства, равна параметрам жидкости, покидающей ступень.

Кратность циркуляции жидкости на ступени определяется соотношением $K = S \cdot L_n / L'_n$, где S – количество контактных устройств на ступени.

Тепловой баланс для контактной ступени запишется как:

$$G(i_{гн} + i_{пн} X_n - i_{гк} - i_{пк} X_k) = L'_k - c_{ж} t'_{жк} - L'_n - c_{ж} t'_{жн}, \quad (42)$$

а для контактного элемента -

$$G(i_{гн} + i_{пн} X_n - i_{гк} - i_{пк} X_k) / S = L_k - c_{ж} t_{жк} - L_n - c_{ж} t_{жн}, \quad (43)$$

Приравняв (42) и (43), получим:

$$t'_{жк} = \frac{L'_n t'_{жн} + L_k t_{жк} S}{L'_k + L_n S}. \quad (44)$$

Рассмотрев материальные балансы для контактной ступени и контактного элемента, получим $L'_k + L_n S = L'_n + L_k S$. (45)

После несложных преобразований выражений (44) и (45) получаются соотношения:

$$\psi' = \frac{1}{1 + K\eta(1 - \psi)}, \eta' = 1 - K(1 - \eta). \quad (46)$$

Полученные соотношения позволяют определить степень нагрева жидкости и степень изменения ее объема на контактной ступени по соответствующим параметрам, рассчитанным для контактных элементов.

В четвертой главе предложена методика расчета и схемы подключения многоступенчатых вихревых экономайзеров.

Иерархическая схема расчета многоступенчатого вихревого экономайзера включает три уровня: расчет контактного элемента; расчет контактной ступени; расчет многоступенчатого аппарата. Расчет контактных ступеней проводится последовательно, начиная с нижней ступени и кончая верхней ступенью. Температура и расход воды, поступающей на каждую (i -ю) ступень с вышележащей ($i+1$ -й) ступени, в начале расчета принимаются равными температуре и расходу воды, поступающей в многоступенчатый аппарат ($L_n, t_{жн}$).

При расчете каждой последующей ступени расход, температура и влагосодержание газа на входе в ступень ($G_i, t_{г,i}, X_i$) принимаются равными рассчитанным на выходе из нижележащей ступени. После расчета всех контактных ступеней их расчет повторяется с уточненными значениями $L_i, t_{ж,i}$. Расчеты повторяются до сходимости значений $L_i, t_{ж,i}$, полученных в предыдущих и последующих расчетах для всех контактных ступеней.

Вихревой экономайзер может использоваться в схемах получения нагретой воды для теплоснабжения (рис.9а) и совместного получения нагретой воды для теплоснабжения и горячего водоснабжения (рис.9б).

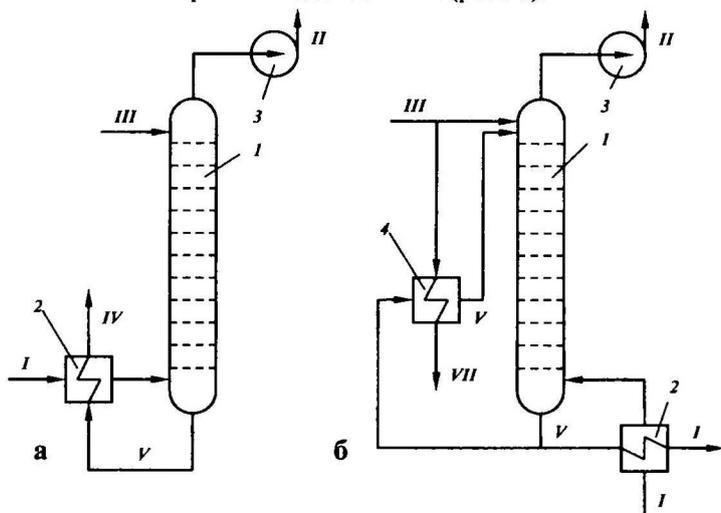


Рис. 9. Схемы получения нагретой воды в вихревых экономайзерах: I – дымовой газ в экономайзер; II – охлажденный дымовой газ; III – холодная вода; IV – нагретая вода для теплоснабжения; V – частично подогретая вода из экономайзера; VI – рециркулирующая вода; VII – нагретая вода для водоснабжения. 1 – вихревой экономайзер; 2 – поверхностный подогреватель "вода – дымовой газ"; 3 – дымосос; 4 – теплообменник "вода – вода".

Нагреваемая в экономайзере вода даже при температурах газа выше 500°C не нагревается выше температуры мокрого термометра паро-газовой смеси на выходе, что при различных влажосодержаниях дымового газа составляет $65\text{--}75^{\circ}\text{C}$. Однако согласно требованию СНиП 41-01-2003 температура воды в системах отопления зданий различных категорий должна составлять $85\text{--}150^{\circ}\text{C}$. Для подогрева воды до требуемой температуры можно применить дополнительный поверхностный аппарат (рис.9а). Применение для утилизации тепла только одного поверхностного аппарата нецелесообразно, так как потребует непомерно большой поверхности теплообмена из-за малых значений коэффициента теплоотдачи от газа к теплопередающей поверхности, составляющих $15\text{--}25 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$.

Отличие схемы с получением нагретой воды для горячего водоснабжения (рис.9б) заключается в том, что часть нагретой воды из вихревого экономайзера 1 направляется в теплообменник 4, где отдает тепло свежей воде. Нагретая в экономайзере вода не может непосредственно использоваться для горячего водоснабжения из-за растворенных в ней газов, таких как диоксид серы, диоксид углерода, оксиды азота и др.

Результаты расчетов контактных элементов вихревого экономайзера, показали, что при небольших соотношениях расходов жидкости и газа на ступени ($L/G < 0,5$) и высоких температурах газа вода в пределах одной контактной ступени нагревается до температуры, близкой к температуре мокрого термометра паро-газовой смеси. Это означает, что при прохождении следующих ступеней вода будет нагреваться незначительно. В этом случае целесообразно применить секционирование многоступенчатого экономайзера с распределением подачи свежей воды по высоте колонны. Это позволит значительно увеличить производительность установки по нагретой воде, но средняя температура после смешения воды из всех секций будет ниже по сравнению с обычным вариантом обвязки колонны.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ и сопоставление основных показателей работы экономайзеров с непосредственным контактом газа с нагреваемой жидкостью показали перспективность использования многоступенчатых вихревых аппаратов с тангенциально-лопаточными завихрителями газа, как обладающих высокой пропускной способностью по газу, малыми габаритными размерами и металлоемкостью.
2. На основе математического моделирования движения одиночных капель в рабочей зоне контактных элементов вихревых экономайзеров рассчитаны траектории, скорости и времена пребывания капель в контактных элементах. Установлено, что испарение жидкости с поверхности капель не приводит к существенному изменению диаметра капель за время существования капель, и диаметр капель можно считать неизменным. В результате обработки расчетных данных получены формулы для определения времени пребывания капель в контактном элементе, скорости движения капель относительно газа и коэффициентов проскальзывания капель относительно газа в окружном и

осевом направлениях.

3. Разработана математическая модель процессов тепло- и массообмена в контактных элементах вихревых экономайзеров, учитывающая как нагрев капель жидкости, так и испарение жидкости с их поверхности. Проведенные экспериментальные исследования процесса получения нагретой воды в вихревом контактном элементе подтвердили адекватность разработанной математической модели.
4. В результате численных исследований выявлены закономерности нагрева воды и охлаждения газа в контактных вихревых элементах, определено влияние геометрических параметров, температур газа и жидкости, влагосодержания и скорости газа на эффективности процессов охлаждения газа и нагрева воды в контактном элементе.
5. Аналитическим путем получены зависимости, связывающие степени нагрева жидкости и изменения ее расхода в контактном элементе и на контактной ступени. Предложен алгоритм расчета многоступенчатого вихревого экономайзера.
6. Предложены схемы подключения вихревого экономайзера для случаев получения нагретой воды для теплоснабжения и одновременного получения нагретой воды для теплоснабжения и горячего водоснабжения.

Основные обозначения.

a – коэффициент температуропроводности; a_k – диаметр капли; c_a – коэффициент лобового сопротивления капли; c_p – изобарная теплоемкость; D – коэффициент молекулярной диффузии; F – площадь; g – ускорение свободного падения; $g(\xi)$ – функция расхода газа по высоте контактного элемента; G – расход газа; h_0 – удельная теплота парообразования; H – высота контактного элемента; h – текущая высота; i – энтальпия; L – расход жидкости; M – молярная масса; q – плотность теплового потока; r, φ, z – цилиндрические координаты; R – радиус аппарата, контактного элемента; t – температура; U – скорость капель; W – скорость газа; X – абсолютное влагосодержание; y – концентрация в газовой фазе; α – коэффициент теплоотдачи; β – коэффициент массоотдачи; λ – теплопроводность; μ – динамический коэффициент вязкости; ν – кинематический коэффициент вязкости; ρ – плотность; τ – время; $\bar{\theta}_{cp} = (t_{cp} - t_{гр}) / (t_n - t_{гр})$ – безразмерная избыточная температура; $Nu = \alpha a_k / \lambda_r$ – число Нуссельта; $Sh = \beta_y a_k / D_r$ – число Шервуда; $Pr = c_p \mu_r / \lambda_r$ – число Прандтля; $Sc = \nu_r / D_r$ – число Шмидта; $Re = a_k U_{отн} / \nu_r$ – число Рейнольдса; $Fo = 4\alpha\tau / a_k^2$ – число Фурье. Индексы: б – на выходе из капельного слоя; г – газ; ж – жидкость; п – пар; к – конечный; н – начальный; * – равновесный; см – смеси; ср – средний; вх – на входе; отн – относительный; R – на расстоянии радиуса от оси.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Николаев, Н.А. Динамика испаряющихся капель в полых вихревых аппаратах при охлаждении высокотемпературных газообразных выбросов энергетических установок / Н.А. Николаев, Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев // Известия РАН. Энергетика. – 2006. – №2. – С.90-94.
2. Нуртдинов, Н.М. Эффективность массопереноса в многоэлементных вихревых аппаратах / Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев // Материалы докладов национальной конференции по теплоэнергетике (НКТЭ-2006), Казань, 2006. –Т.1. – С.117-120.
3. Нуртдинов, Н.М. Метод расчета контактных элементов многоступенчатых вихревых экономайзеров / Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев // Сб. тезисов докл. Общероссийской конференции молодых ученых с международным участием "Пищевые технологии", Казань, 2006. – С. 78-80.
4. Нуртдинов, Н.М. Испарение капель в вихревых аппаратах при охлаждении газообразных выбросов промышленных предприятий / Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев // Сб. тезисов докл. Общероссийской конференции молодых ученых с международным участием "Пищевые технологии", Казань, 2006. – С. 73-74.
5. Нуртдинов, Н.М. Моделирование процессов тепло- и массообмена в контактных элементах вихревых экономайзеров / Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев // Сб. трудов XX Международной научной конференции "Математические методы в технике и технологиях". – 2007. – Т.3. – С. 104-107.
6. Нуртдинов, Н.М. Утилизация тепла дымовых газов в вихревых экономайзерах / Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев // Сборник тезисов докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием "Пищевые технологии", Казань, 2007. – С.182.
7. Нуртдинов, Н.М. Динамика течения газа и жидкости в контактных элементах экономайзеров вихревого типа / Н.М. Нуртдинов, А.А. Овчинников, А.Н. Николаев. – Деп. ВИНТИ № 172-В2008 от 27.02.2008.
8. Нуртдинов, Н.М. Моделирование тепло- и массообмена в экономайзерах вихревого типа / Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев. – Деп. ВИНТИ № 373-В208 от 29.04.2008.

Соискатель:



Нуртдинов Н.М.

Заказ № 168, тираж 100 экз.

Издательство Казанского Государственного Технологического Университета
Офсетная лаборатория Казанского Государственного Технологического Университета

10 ✓