

греющей среды к обогреваемой среде равен коэффициенту теплоотдачи от греющей среды к стенке.

Коэффициент теплоотдачи от греющей среды к стенке находится по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda_c}{d_k} \cdot Nu, \quad (2)$$

где λ_c - коэффициент теплопроводности при средней температуре среды, определяемый для воздуха и дымовых газов по п. 3-03 [2], кВт/(м·К).

d_k - диаметр цилиндрического корпуса, м

Nu - число Нуссельта

Для режима пульсирующего горения число Нуссельта вычисляется по формуле [3]:

$$Nu = 0,7 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,4}, \quad (3)$$

где Pr - число Прандтля при средней температуре потока, определяемое для воздуха и дымовых газов по п. 3-08 [2].

Re - число Рейнольдса:

$$Re = \frac{W_{cp} \cdot d_k}{\sigma}, \quad (4)$$

УДК 662.76

Тимошук А.Л.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КОНТАКТНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ СО СЛОЕВЫМ ПУЛЬСИРУЮЩИМ ГОРЕНИЕМ ГАЗА

Наиболее эффективным методом получения горячей воды на сегодняшний день является контактный нагрев воды [1]. Предлагается использовать слоевое пульсирующее горение (СПГ) для контактного нагрева воды. При этом процесс тепло- и массопередачи протекает интенсивнее за счет колебаний скорости газового потока и давления, возникающих при пульсирующем горении, как это показано в [2]. Целью разработки является создание нового теплотехнического оборудования - контактного водонагревателя по [3] - использующего разработки лаборатории «Пульсар» БГТУ: слоевое пульсирующее горение газообразных топлив, контактный нагрев воды при пульсирующем горении, а также узлы и детали оригинальной конструкции. Предполагаемые достоинства данной разработки:

- высокий КПД, характерный для контактных водонагревателей;
- низкий уровень выбросов вредных веществ при пульсирующем горении;
- простота конструкции и эксплуатации;
- малые габариты, металлоемкость и масса установки.

На основании проведенных исследований слоевого пульсирующего горения газа и контактного нагрева воды при СПГ газа были предложены несколько вариантов конструкции контактного водонагревателя со СПГ газа.

На рис. 1 показана конструкция контактного водонагревателя с СПГ газа и различные варианты исполнения основных узлов, где цифрами обозначены: 1 - жаровая труба - резонансный канал; 2 - коллектор холодной воды; 3 - кожух; 4 - газовая горелка; 5 - воздухопровод; 6 - поперечная перегородка; 7 - вентилятор; 8 - пластинчатый теплообменник; 9 - коллектор горячей воды; 10 - регулятор уровня холодной воды; 11 - ре-

гулятор уровня горячей воды (гидрозатвор, обратный клапан); 12 - регулятор расхода газа; 13 - звукопоглощающий материал; 14 - дымовая труба; 15 - гляделка; 16 - коническое кольцо; 17 - запальник; 18 - газопровод; 19 - регулятор расхода воздуха; 20 - устройство для подачи и регулирования расхода вторичного воздуха; 21 - регулятор положения поперечной перегородки; 22 - сборные желоба; 23 - каплеуловитель; 24 - регулятор расхода холодной воды; 25 - сетчатый каплеуловитель; 26 - газоотводящий патрубок; 27 - водяной коллектор.

Водонагреватель работает следующим образом: В нижнюю часть корпуса 1 через горелку 4 по топливопроводу 18 поступает газообразное топливо, которое, смешиваясь с воздухом над горелкой, образует горючую смесь. Образовавшаяся смесь воспламеняется запальником 17. После воспламенения смеси, необходимый для горения воздух поступает к горелке через воздухопровод 5 под действием вентилятора. Холодная вода подается через регулятор уровня 10 в коллектор 2 через отверстия в корпусе 1 и далее подводится к вертикальным пластинам теплообменника 8, стекая вниз по обим сторонам которых, нагревается проходящими между пластинами потоками горячих продуктов сгорания. Нагретая вода стекает в сборные желоба 22 и, далее, через зазор между ними и корпусом 1, по стенке корпуса 1 в коллектор горячей воды 9, где также нагревается, омывая горячую стенку нижней части корпуса 1. Нагретая вода отбирается через регулятор уровня горячей воды 11. Продукты сгорания, охлажденные при прохождении через теплообменник 8, удаляются через дымовую трубу 14. В корпусе 1 при наличии пламени у горелки устанавливается акустическая стоячая волна, так называемое пульсирующее горение. Это интенсифицирует процесс теплообмена на вертикальных пластинах за счет знакопеременной составляющей скорости потока продуктов сгорания.

где σ - коэффициент кинематической вязкости при средней температуре потока, определяемый для воздуха и дымовых газов по п. 3-03 [2]

W_{cp} - среднерасходная скорость движения газа, м/с (формула 7-21 [2])

d_k - то же, что в формуле (2)
Задаваясь температурами из опыта эксплуатации экспериментальной установки и расходом топлива $B = 2,5$ кг/час имеем: $\lambda = 9,15 \cdot 10^{-2}$ кВт/(м·К), $Pr = 0,59$, $\sigma = 126 \cdot 10^{-6}$. После подстановки численных значений в выражения (1)-(4) и математических преобразований получаем: $Re = 5240$, $Nu = 41$, $\alpha = 24$ кВт/($M^2 \cdot K$), $Q = 24,6$ кВт.

Таким образом, тепловая мощность водонагревателя предложенной конструкции составляет 24,6 кВт.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новосельцев В.Г. Корректирующий водонагреватель со слоевым пульсирующим горением. Вестник БГТУ, № 2, 2004. - С. 46-48
2. Тепловой расчет котельных агрегатов/ Под ред. Кузнецова Н.В., Митора В.В., Дубовского И.Е., Карасиной Э.С. М.- Энергия, 1973. - 38 с.
3. Технологическое пульсационное горение/ Под ред. Попова В.А.- М. -Энергоатомиздат, 1993. - 32-34 с.

Тимошук Александр Леонидович, аспирант каф. водоснабжения, водоотведения и теплоснабжения Брестский государственный технический университет.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

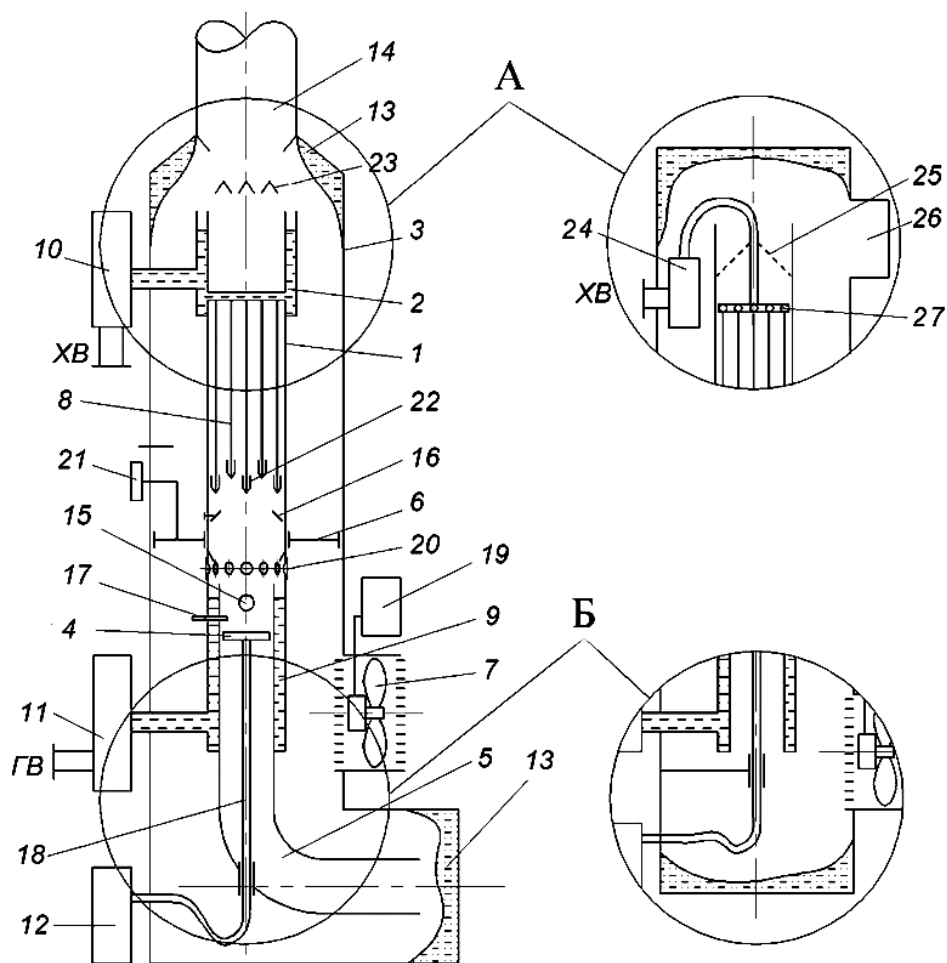


Рис. 1. Схема контактного водонагревателя.

Технико-экономический эффект заключается в снижении габаритов, массы и материалоемкости при неизменной тепловой мощности, а также повышении КПД за счет снижения потерь тепла с уходящими газами при их глубоком охлаждении и улучшение условий теплообмена.

Альтернативный вариант конструкции узла «А» на рис. 1 отличается следующим:

- подача холодной воды осуществляется с напором, что позволяет легко регулировать расход воды при помощи регулятора расхода 24 и подключать водонагреватель к водопроводной сети. Увеличивается производительность водонагревателя по воде;
- для равномерного распределения холодной воды по поверхности пластин при ее напорной подаче используется водяной коллектор 27;
- для отвода продуктов сгорания вместо дымовой трубы, расположенной вертикально может быть использован горизонтальный газоотводящий патрубок 26;
- применение сетчатого каплеуловителя 25, расположенного внутри резонансного канала, вместо каплеуловителя 23 (выполненного из желобов).

Отличие конструкции узла «Б» заключается в том, что воздух для горения подается непосредственно в резонансный канал, а воздуховод 5 отсутствует. Это позволяет уменьшить габариты водонагревателя по ширине и упростить конструкцию, однако, в силу того, что длина резонансного канала – величина постоянная – увеличивается высота водонагревателя.

Для определения основных конструктивных параметров таких элементов контактного водонагревателя как жаровая труба – резонансный канал, шумоглушитель, пластинчатый контактный теплообменник, горелка можно дать рекоменда-

ции, основывающиеся на известных зависимостях и результатах исследования процесса слоевого пульсирующего горения газообразного топлива и контактного нагрева воды продуктами сгорания при СПГ. Исходной величиной, определяющей размеры основных элементов, является тепловая мощность P контактного водонагревателя. Исследованный диапазон мощности, при котором наблюдался устойчивый режим СПГ газа (в качестве газообразного топлива в экспериментах использовалась пропанбутановая смесь) составил 5 – 30 кВт, а максимальное теплонапряжение поверхности горения у горелки порядка 1,5 – 2 МВт/м². В работе [4] при исследовании СПГ газа достигнута мощность 140 кВт. Приведенные ниже рекомендации можно использовать для водонагревателей мощностью от 1 до 100 кВт. При необходимости увеличения мощности рекомендуется использовать блочные конструкции из нескольких водонагревателей, объединённых общими системами подачи топлива и воды.

В качестве резонансного канала используется труба. Исходя из требуемой тепловой мощности, диаметр резонансного канала – трубы можно определить из соотношения:

$$D = \sqrt{\frac{4Q_B^P B}{\pi N_F \eta}} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi N_F \eta}}, \quad (1)$$

где Q_B^P – высшая теплота сгорания топлива, МДж/м³; B – расход топлива, м³/с; N_F – тепловое напряжение поверхности горения у горелки (1,5... 2 МВт/м²); η – КПД водонагревателя (90 – 95%); Q – тепловая мощность водонагревателя, МВт.

Длина резонансного канала должна удовлетворять условию $L=(15...50)D$.

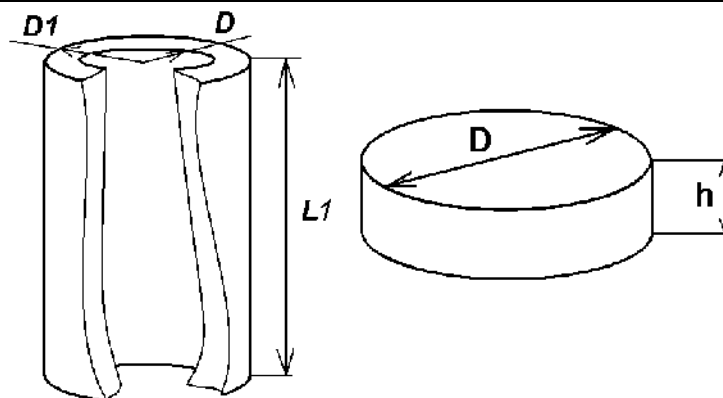


Рис. 2. Основные характеристики полости и горла резонатора.

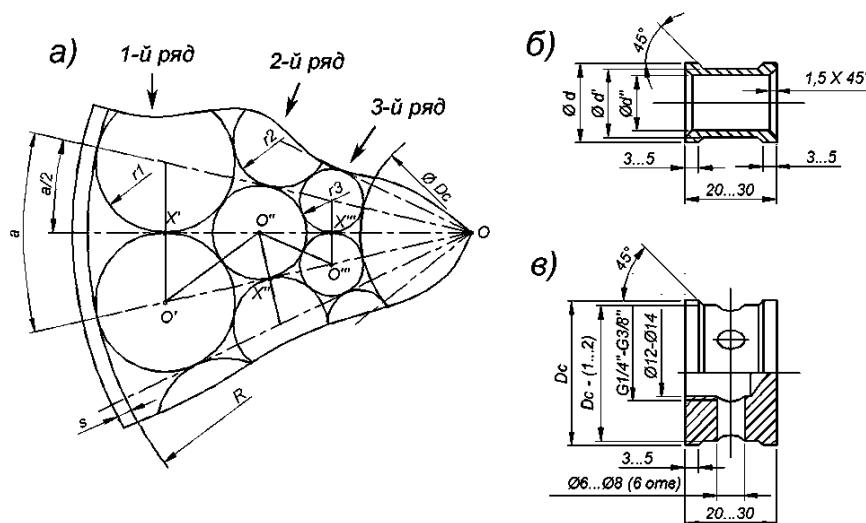


Рис. 3. К расчету горелки для СПГ газа: а) схема расположения трубок; б) основные размеры трубки; в) сердечник.

Одним из возможных вариантов снижения уровня шума при работе водонагревателя является применение глушителя. Верхняя и нижняя части полости между кожухом 3 и жаровой трубой 1, разделенные поперечной перегородкой 6 являются реактивными глушителями звука и работают по принципу резонатора Гельмгольца (рис 2).

Таким образом, глушение шума осуществляется как на входе воздуха, так и на выходе продуктов сгорания. Расчет размеров кожуха – глушителя производится из условия равенства частоты колебаний давления при СПГ и резонансной частоты глушителя: $f_c = f_p$.

Частота колебаний давления при СПГ определяется длиной резонансного канала:

$$f_c = \frac{c}{2 \cdot L}, \quad (2)$$

где c – скорость звука в канале, м/с; L – длина канала, м

Резонансная частота для одиночного резонатора Гельмгольца, на которой наблюдается максимальное поглощение энергии согласно [5, с. 47 – 48] определяется из соотношения:

$$f_p = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{K_g}{V}}, \quad (3)$$

где K_g – проводимость горла отверстия, $K_g = \frac{S_0}{l_0 + 0,8d_e}$;

V – внутренний объем полости, $V = \frac{\pi L1}{4} (D1^2 - D^2)$, м³;

S_0 – площадь сечения горла резонатора, $S_0 = \pi D h$, м²;

$D1$ – наружный диаметр кожуха, м; $L1$ – высота полости (половина длины кожуха), $L1 = \frac{L}{2} + h$, м; l_0 – длина горла

резонатора (толщина стенки трубы – резонансного канала), м; d_e – эквивалентный диаметр горла резонатора, м.

В случае коаксиального расположения кожуха, горло резонатора Гельмгольца имеет форму цилиндра (рис. 2), эквивалентный диаметр которого:

$$d_e = \frac{4S_0}{P} = \frac{4\pi D h}{\pi D} = 4h, \quad (4)$$

где S_0 – площадь горла, м²; P – периметр горла, м; h – высота горла, м.

Задаваясь величиной h , и приравняв выражения (2) и (3), при известном диаметре D и длине L с учетом (4) определяем наружный диаметр кожуха – глушителя.

При диаметре резонансного канала $D=0,1$ м, длине его $L=2$ м, величине горла $h=0,05$ м и частоте колебаний давления $f_c=87,5$ Гц, толщине стенки $l_0=0,005$ м, наружный диаметр кожуха – глушителя составляет $D1=0,28$ м.

В контактном водонагревателе по рис. 1 используется горелка нового типа по [5].

Основной задачей при проектировании горелки является определение диаметров трубок каждого ряда (рис. 3). Исходными данными для расчета являются:

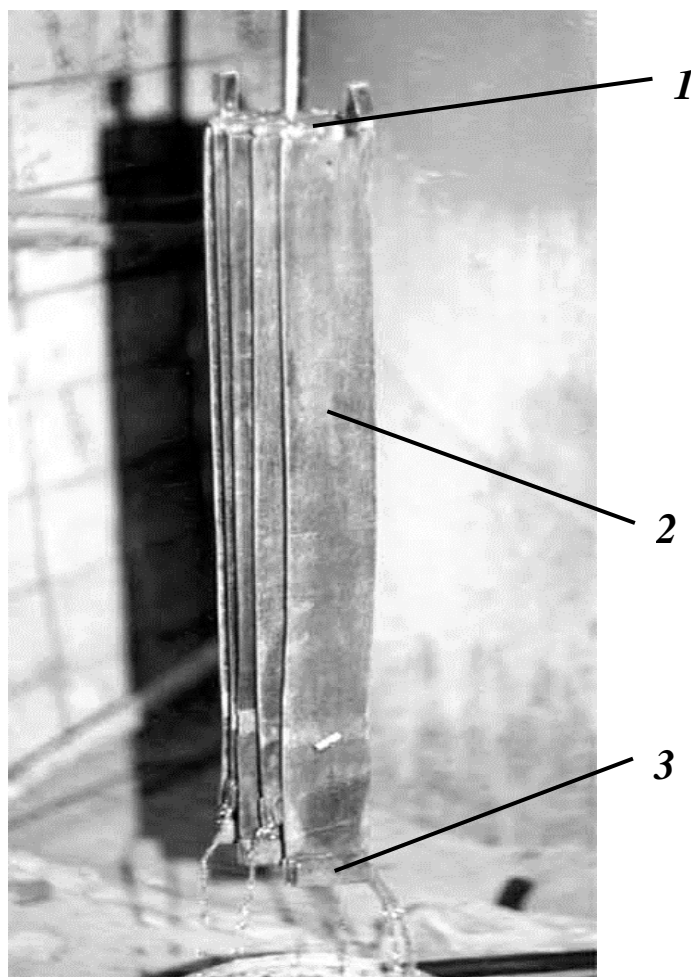


Рис. 4. Контактный пластинчатый теплообменник: 1 – водяной коллектор, 2 – пластина, 3 – сборные желоба.

- толщина наружного кольца $s=3...5$ мм;
- наружный диаметр горелки (определяется диаметром резонансного канала) $DГ=D-2s-(2...3$ мм);
- количество трубок в каждом ряду $n=12-17$.
Определяем радиус трубок первого ряда:

$$r1 = R \frac{\sin\left(\frac{a}{2}\right)}{\sin\left(\frac{a}{2}\right) + 1}, \quad (5)$$

где R – наружный радиус горелки, м; $a=2\pi/n$ – угол между касательными к окружности трубки, проведенными из центра горелки.

Радиус трубок второго ряда определяется из рассмотрения подобия треугольников $OO'X'$ и :

$$\frac{r1}{r2} = \frac{\sqrt{(R-r1)^2 - r1^2}}{(R-r1) - \sqrt{(r1+r2)^2 - r2^2}}. \quad (6)$$

Решая уравнение (6) относительно $r2$ определяем радиус трубок второго ряда.

Аналогичным способом определяем радиус трубок третьего ряда, рассматривая подобие треугольников $OO'X''$ и $OO'''X'''$:

$$\frac{r2}{r3} = \frac{(R-r1) - \sqrt{(r1+r2)^2 - r2^2}}{\frac{r2}{\sin\left(\frac{a}{2}\right)} - \sqrt{(r2+r3)^2 - r3^2}}. \quad (7)$$

Затем определяется диаметр сердечника D_C при рассмотрении треугольника $OO''X''$:

$$D_C = 2 \cdot r3 \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{a}{2}\right)} - 1 \right). \quad (8)$$

Основные геометрические параметры трубки следующие (рис. 3, б):

- наружный диаметр $d=2r$ (r – радиус трубки соответствующего ряда);
- диаметр выточки $d'=d-(1...2$ мм);
- диаметр воздушного отверстия $d''=d^2-(2...4$ мм);

Остальные размеры выбираются из диапазонов, указанных на рис. 3, б, и должны быть одинаковыми для всех трубок всех рядов.

Сердечник горелки показан на рис. 3, в), его высота принимается равной 20...30 мм и должна соответствовать высоте трубок.

Контактный пластинчатый теплообменник (рис. 4) представляет собой комплект пластин, на концах которых имеются сборные желоба, прикрепленных сверху к водяному коллектору.

Количество пластин определяется двумя условиями. С одной стороны, чем их меньше, тем меньше аэродинамическое сопротивление, следовательно, улучшается акустика, повышается надежность пульсационного режима, но снижается производительность аппарата по воде. С другой – чем их

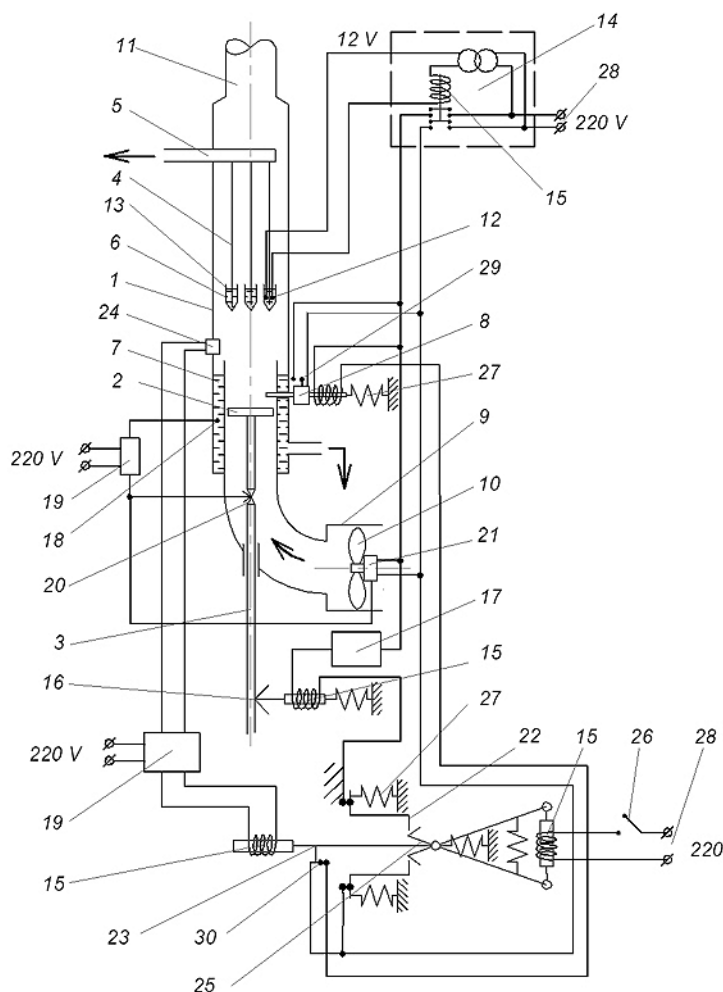


Рис. 5. Автоматизированный водонагреватель.

больше, тем компактнее устройство, скорости и производительность выше, а теплообмен происходит более интенсивно, однако, уменьшаются тепловая нагрузка по топливу и производительность, требуется большой расход энергии на дутье. Здесь как раз, кстати, приходится интенсифицирующий фактор пульсации, когда не требуется большое количество пластин, но зато пульсационный режим устойчивый.

Длина пластин, с одной стороны, ограничена уменьшением производительности (если их укорачивать), с другой (если их удлинять) – переходом нагрева воды в кипение и испарение, что не требуется.

Работа пластинчатого теплообменника происходит следующим образом. Вода поступает в коллектор холодной воды 1. Затем, равномерно распределяясь по поверхности пластин 2, стекает вниз, нагревается продуктами сгорания, проходящими между пластинами, и направляется сборными желобами 3 в коллектор горячей воды.

Одним из важнейших показателей, характеризующим контактный теплообменник, является удельная поверхность контакта на единицу объема контактной камеры. В литературе [7, с. 16–17] приводятся данные о величине удельной поверхности контакта при различных методах организации контакта фаз. Для пленочного режима течения, который реализован в исследуемом контактном водонагревателе, этот показатель составляет 50–500 м²/м³. В предлагаемой конструкции величина удельной поверхности контакта зависит от количества пластин и может быть определена как:

$$F' = \frac{F_k}{V} = \frac{8}{\pi D} \cdot \left(1 + 2 \sum_{i=1}^{n-1/2} \sqrt{1 - \frac{4i^2}{(n+1)^2}} \right), \quad (9)$$

где F_k – площадь пластин теплообменника, м²;
 V – объем, занимаемый теплообменником, м³;
 D – наружный диаметр теплообменника, м;
 n – количество пластин.

Удельная поверхность контакта для испытанного водонагревателя с диаметром теплообменника $D=0,1$ м, количеством пластин $n=5$ по формуле (9) составит:

$$F' = \frac{F_k}{V} = \frac{8}{3,14 \cdot 0,1} \cdot \left(1 + 2 \sum_{i=1}^2 \sqrt{1 - \frac{4i^2}{36}} \right) = 111,44 \text{ (м}^2/\text{м}^3\text{)}$$

Таким образом, предлагаемый контактный пластинчатый теплообменник позволяет создать развитую поверхность теплообмена в небольшом объеме, что является предпосылкой для уменьшения габаритов водонагревателя.

На рис. 5 изображена конструкция автоматизированного контактного водонагревателя. Его отличие заключается в возможности работы водонагревателя в автоматическом режиме, т.е. автоматическом включении при потреблении воды, отключении при обезвоживании, автоматическом останове, поддержании заданной температуры воды.

На рис. 5 показан продольный разрез по водонагревателю, где цифрами обозначены: корпус – 1, горелка – 2, топливопровод – 3, теплообменник – 4, коллектор – 5, желоба – 6, сборник горячей воды – 7, запальник – 8, глушитель – 9, вентилятор – 10, газоотвод – 11, электроконтакты – 12, пусковое реле – 13, соленоиды – 14, отсечной газовый клапан – 15, реле

времени – 16, датчик температуры – 17, усилитель и задатчик – 18, регулирующий газовый клапан – 19, регулятор частоты вращения вентилятора – 20, разъединитель – 21, датчик звука – 22, размыкатель – 23, кнопка отключения блокировки – 24, пружины – 25, внешняя электросеть – 26, контакты искры запальника – 27, контакты подачи запальника – 28. Штриховкой обозначены неподвижные контакты.

Работает автоматизированный водонагреватель следующим образом. Холодная вода подается через коллектор 5 в теплообменник 4, а затем стекает в желоба 6, где замыкает электроконтакты 12 электрической цепи пускового реле 13, которое замыкает питающую цепь, последовательно включая: запальник 8, вентилятор 10, соленоид 14, отсечной газовый клапан 15 (регулирующий газовый клапан 19 открыт), разъединитель 21. Для продувки аппарата воздухом предусмотрено реле времени 16, которое обеспечивает задержку открытия отсечного газового клапана 15. После открытия отсечного газового клапана 15 топливо по топливopоводу 3 поступает к горелке 2, где воспламеняется запальником 8. Вода, проходя теплообменник 4, нагревается и по желобам 6 поступает в сборник горячей воды 7, где установлен датчик температуры 17, сигнал от которого, проходя усилитель и задатчик 18, служит для управления регулирующего газового клапана 19 и регулятора частоты вращения вентилятора 20. Контроль процесса горения осуществляется датчиком звука 22, который преобразует колебания давления при слоевом пульсирующем горении в эквивалентные им электрические. Сигнал от датчика звука 22, проходя усилитель и задатчик 18, управляет соленоидом 14, соединенным с размыкателем 23. При погасании пламени цепь соленоида 14 размыкается, и пружины 25 размыкают разъединитель 21. Электрическая цепь размыкается и закрывается отсечной газовый клапан 15. Прекращается подача топлива, отключается подача воздуха. Для запуска аппарата необходимо снять блокировку нажатием

кнопки снятия блокировки 24. При пуске включаются контакты подачи запальника 28, запальник 8 вводится в корпус 1, замыкаются контакты искры запальника 27, газ у горелки 2 воспламеняется, включается датчик звука 22, размыкаются контакты подачи запальника 28, запальник 8 удаляется из корпуса 1 и одновременно размыкаются контакты искры запальника 27.

Технико-экономический эффект заключается в обеспечении оптимальности и безопасности работы контактного нагревателя за счет автоматизации процесса пуска, горения и нагрева воды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Соснин Ю.П. Контактные водонагреватели.—М.: Стройиздат, 1974.—359 с.
2. Подымов В.Н., Северянин В.С., Щелоков Я.М. Прикладные исследования вибрационного горения.— Казань: Изд-во КГУ, 1978.— 219 с.
3. Патент ВУ 1468U, F 24H 1/00. Водонагреватель/ Северянин В.С., Тимошук А.Л.— заявл. 04.08.2003, опубл. 30.09.2004.
4. Bai T., Cheng X.C., Daniel B.R., Jagoda J.I. and Zin B.T. Performance of a Gas Burning Rijke Pulse Combustors with tangential Reactants injection // Proceedings of the International Symposium on Pulsating Combustion. August 5–8, 1991.— Vol.1— Monterey, California, USA.
5. Карпов Ю.В., Дворянцева Л.А. Защита от шума и вибраций на предприятиях химической промышленности.— М.: Химия, 1991.— 120 с.
6. Патент ВУ 1469U, F 23D 14/00. Горелка/Северянин В.С., Тимошук А.Л.— заявл. 08.12.2003, опубл. 30.09.2004.
7. Галустов В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике.— М.: Энергоатомиздат, 1989.— 240 с.

УДК 624.042.5

Кофанов В.А.

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ТРЕХСЛОЙНУЮ ОГРАЖДАЮЩУЮ КОНСТРУКЦИЮ

ВВЕДЕНИЕ

Очень часто наружные стены зданий выполнены с использованием цементосодержащих защитно-отделочных покрытий. В результате сложного взаимодействия этих покрытий с окружающей средой и материалом защищаемой конструкции они довольно быстро теряют способность выполнять свои функции и разрушаются с наружной поверхности или отслаиваются по ослабленным зонам.

Считается [1, 2 и др.], что для обеспечения длительной совместной работы стыкуемых материалов конструкции в заданных условиях эксплуатации они должны быть близкими по своим свойствам. Однако при этом достаточно сложно ответить на вопрос о том, в какой мере и какие свойства соединяемых материалов должны совпадать.

Деградация капиллярно-пористых материалов ограждающих конструкций тесно связана с их температурно-влажностным и напряженно деформированным состоянием, которые формируются в толще конструкции при нестационарных процессах переноса тепла и влаги. Поэтому долговечность совместной работы соединяемых материалов слоистой конструкции при заданных условиях эксплуатации, в основном, будут определяться соотношением показателей, отража-

ющих их теплотехнические, физико-механические и капиллярные свойства, а также толщиной слоев.

В данной работе расчетным путем с помощью разработанных нами моделей [3, 4], выполнена оценка влияния отмеченных факторов на температурно-влажностное и напряженно-деформированное состояние выбранной двухслойной ограждающей конструкции, эксплуатируемой в климатических условиях г. Бреста. В указанные модели были введены дополнительные зависимости, учитывающие влияние атмосферных осадков.

ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

Для учета влияния атмосферных осадков на влажосодержание материалов ограждающих конструкций необходимо располагать данными о количестве жидкой влаги, попадающей на поверхность ограждения во время дождя. Количество жидкой влаги, попадающей на эту поверхность, зависит от интенсивности дождевого потока на эту поверхность, который в свою очередь зависит от различных факторов, среди которых следует отметить скорость ветра и положение поверхности ограждения относительно поверхности земли.

Кофанов Валерий Анатольевич, аспирант кафедры строительной механики Брестский государственный технический университет.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.