

Рисунок 3.

Таким образом, некоторое снижение КПД котла может снизить общий (вместе с потребляемой извне энергией) расход топлива и улучшает эксплуатацию котельного агрегата. Метод особенно эффективен в зимнее время при низкой температуре окружающей среды, именно когда и работают водогрейные пиковые котлы.

Другой подход к проблеме снижения $T_{ух}$ должен быть для случая изохорности горения. На рис. 3 дана схема котла с

УДК 621.438

Черников И.А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРЕРЫВИСТОЙ ПОДАЧИ ВОЗДУХА В ТОПКУ

При разработке физико-математической модели прерывистой подачи воздуха в топочный объем, была получена основная физическая зависимость данного процесса - мгновенная скорость потока W_6 (изменение скорости во времени) [1]:

$$W_6 = W_2 \cdot \frac{\rho_2 \zeta_{вых} \cdot \left[\frac{\tau_3 F \mu_2 \psi_2 \sqrt{R_2 T_2} \cdot (n_2 - 1)}{2V} + 1 \right]^{\frac{2n_2}{n_2 - 1}}}{\rho_6 \zeta_{вх} \cdot \left[\frac{\tau f \mu_6 \psi_6 \sqrt{R_6 T_6} \cdot (n_6 - 1)}{2V} + 1 \right]^{\frac{2n_6}{n_6 - 1}}} \quad (1)$$

где W - скорость потока, ρ - плотность потока, $\zeta_{вх}, \zeta_{вых}$ - коэффициенты местных сопротивлений входного и выходного отверстий, μ - коэффициент расхода отверстия, ψ - добавочный коэффициент, R - газовая постоянная, T - температура потока, V - топочный объем, n - показатель политропы, f - сечение входного отверстия, F - сечение выходного отверстия, τ_3 - время закрытого положения входного отверстия, τ - время периода (сумма времени открытого и закрытого положения воздушной заслонки). Индекс 2 отражает газовые характеристики, индекс 6 - характеристики воздуха.

Наличие многих аргументов в данной зависимости показывает сложность процесса, что значительно затрудняет решение вопроса экспериментальной проверки математической модели.

Для упрощения условий решения задачи процесс горения в эксперименте исключен. Соответственно все аргументы в формуле (1) запишутся с индексом 6:

пульсирующим горением в виде удлиненного канала, заполненного поверхностями нагрева, слева - камера горения с воздушным клапаном. Периодическое повышение давления позволяет реализовать энергию для прокачки топочных газов через поверхности нагрева, при этом

$$(B_1 + B_6) / B_7 = (1 - \eta^{III}) \cdot (1 + \eta^{III} / \eta), \quad (8)$$

и для реальных значений КПД пульсирующего горения η^{III} и общего термического η_t имеем

$$B_7 < (B_1 + B_6).$$

Кроме этого, из-за интенсификации горения и теплообмена габариты резко снижаются, поэтому $T_{ух}^{онм}$ смещается влево согласно рис. 1. Известно, что котлы с пульсирующим горением небольшой мощности проектируются с учетом конденсации водяных паров из топочных газов, что ведет к общей экономии топлива.

$$W_6 = W_2 \cdot \frac{\rho_6 \zeta_{вых} \cdot \left[\frac{\tau_3 F \mu_6 \psi_6 \sqrt{R_6 T_6} \cdot (n_6 - 1)}{2V} + 1 \right]^{\frac{2n_6}{n_6 - 1}}}{\rho_6 \zeta_{вх} \cdot \left[\frac{\tau f \mu_6 \psi_6 \sqrt{R_6 T_6} \cdot (n_6 - 1)}{2V} + 1 \right]^{\frac{2n_6}{n_6 - 1}}} \quad (2)$$

Подставив в зависимость (2) численные значения аргументов ($\rho_6 = 1.3 \text{ кг/м}^3$, $\mu_6 = 0.6$, $\psi_6 = 0.685$, $R_6 = 287$, $T_6 = 295 \text{ K}$, $n_6 = 1.4$, $V = 1.4 \text{ м}^3$), после преобразований получим

$$\left(\frac{W_6}{W_2} \right)^{0.286} \cdot \left(\frac{\zeta_{вых}}{\zeta_{вх}} \right)^{0.143} \cdot \frac{17.08 \cdot \tau_n \cdot f + 1}{17.08 \cdot \tau_3 \cdot F + 1} = 1. \quad (3)$$

Исходя из уравнения (3), был изготовлен экспериментальный стенд обеспечивающий получение соответствующих физических параметров - $W_6/W_2, \tau_n, \tau_3, f, F$.

Стенд (рис. 1) представляет собой горизонтальный цилиндр 1; патрубок 2, с сечением F для входа воздуха в цилиндр; патрубок 3, с сечением f для выхода воздуха из цилиндра; вентилятор 4.

Для прерывания входящего воздушного потока патрубок 2 имеет воздушную заслонку 5. При закрытии заслонки замыкаются контакты 6, включая электронный секундомер. В патрубки 2, 3 вставлены трубки 7, одинаковые по геометрическим размерам и развернутые навстречу воздушному потоку. В качестве прототипа используются Г-образные напорные трубки системы Прандтля, но с одним отверстием, совмещающим полное и статическое давление [2]. На трубки 7, надеты гибкие шланги 8, одинаковые по диаметру и длине. Подставка 9 обеспечивает крепление концов шлангов на одинаковом удалении от стрелки 10, изготовленной из пенопласта. На подставке 9 закреплена шкала 11.

Черников Игорь Анатольевич. Инженер НИС Брестского государственного технического университета. Беларусь, БГТУ, 224107, г. Брест, ул. Московская, 267.

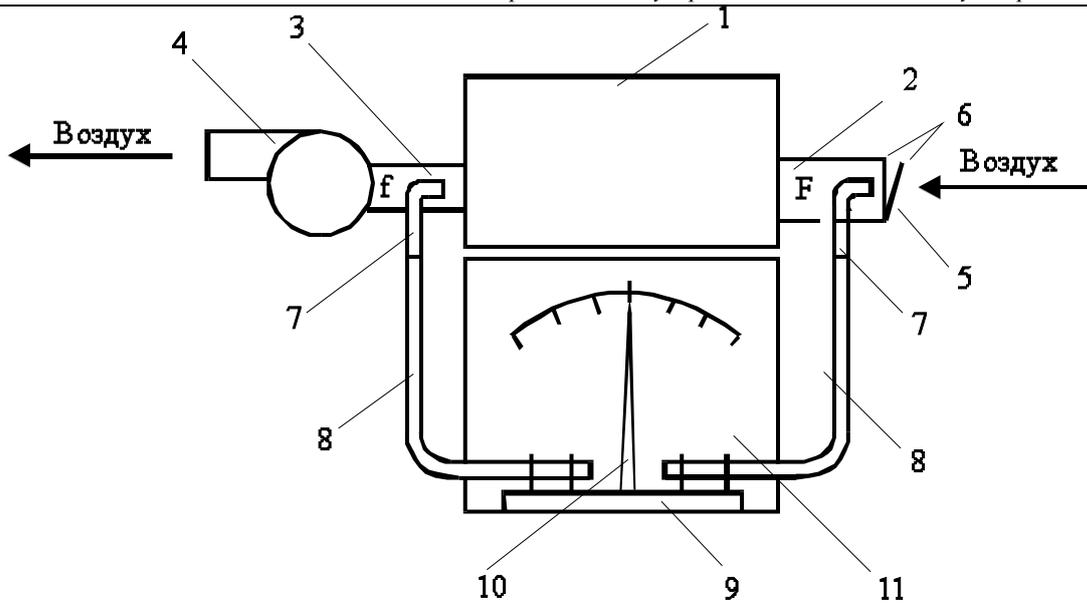


Рисунок 1 – Лабораторный стенд.

Общее время τ в опыте равно времени периода τ_n ($\tau_n = \tau_3 + \tau_o$, где τ_3 - время закрытого положения воздушной заслонки; τ_o - время открытого положения воздушной заслонки).

Особая сложность в эксперименте заключалась в определении времени τ_3 , т.к. оно составляет десятые доли секунды, ввиду чего не представлялось технически возможным закрывать и открывать входное воздушное отверстие с одинаковым интервалом времени. Для решения этой проблемы был изготовлен электронный секундомер, позволяющий получать время с точностью в сотые секунды. В момент закрытия входного воздушного отверстия F контакты 6 электронного секундомера замыкаются фиксируя время закрытого положения воздушной заслонки τ_3 . При открытии воздушного отверстия контакты размыкаются, но время закрытого положения воздушной заслонки при этом не сбрасывается, а останавливается. Таким образом происходит накопление времени, получая в итоге общее время закрытого положения заслонки $\tau_3^{общ}$, за несколько периодов n_3 (число закрытий воздушной заслонки). Из полученных величин рассчитываем среднее значение закрытого положения воздушной заслонки (за один период)

$$\tau_3^{cp} = \frac{\tau_3^{общ}}{n_3}.$$

Средняя величина открытого положения воздушной заслонки за период равна

$$\tau_o^{cp} = \frac{\tau_n - \tau_3^{общ}}{n_3}.$$

Тогда среднее время периода

$$\tau_n^{cp} = \tau_3^{cp} + \tau_o^{cp}.$$

В момент включения вентилятора 4 при открытой воздушной заслонке 5, стрелка 10 отклоняется на величину $k = W_e / W_z$ в делениях шкалы 11.

С учетом величины k уравнение (3) запишется

$$k^{0,286} \cdot \left(\frac{\zeta_{вых}}{\zeta_{вх}} \right)^{0,143} \cdot \frac{17,08 \cdot \tau_n \cdot f + 1}{17,08 \cdot \tau_3 \cdot F + 1} = 1. \quad (4)$$

Средняя величина k за время опыта будет

$$k^{cp} = \frac{\sum k}{n},$$

где n - число надежно определенных значений k .

Расчет коэффициентов местных сопротивлений производим по соответствующим формулам [3], исходя из геометрических размеров лабораторного стенда.

Для внезапного сужения при любых формах сечений:

$$\zeta_{вых} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{f}{F} \right) = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{0,0007}{0,00196} \right) = 0,321 \approx 0,3.$$

На входном сечении для воздушной заслонки коэффициент рассчитываем по формуле для задвижки:

$$\begin{aligned} \zeta_{вх} &= 2,1 \cdot \left(1 - \frac{b}{B} \right) \cdot \left(\frac{B}{b} \right)^2 - 0,54 \cdot \sqrt{1 - \frac{b}{B}} = \\ &= 2,1 \cdot \left(1 - \frac{0,02}{0,06} \right) \cdot \left(\frac{0,06}{0,02} \right)^2 - 0,54 \cdot \sqrt{1 - \frac{0,02}{0,06}} = \\ &= 12,159 \approx 12,2. \end{aligned}$$

Подставив численные значения коэффициентов в (4) получим:

$$k^{0,286} \cdot \left(\frac{0,3}{12,2} \right)^{0,143} \cdot \frac{17,08 \cdot \tau_n \cdot f + 1}{17,08 \cdot \tau_3 \cdot F + 1} = 1,$$

$$\text{или} \quad 0,589 \cdot k^{0,286} \cdot \frac{17,08 \cdot \tau_n \cdot f + 1}{17,08 \cdot \tau_3 \cdot F + 1} = 1. \quad (5)$$

Используя численные значения экспериментальных и расчетных данных сведенных в таблицу 1, произведен расчет зависимости (5), которая оказалась справедливой для всех случаев, т.к. (5) близка к 1. Результаты расчета см. в графе 10.

Полученные данные подтвердили состоятельность физико-математической модели [1] и правильность подхода к решению вопросов, связанных с процессом прерывистой подачи воздуха в топку.

Таблица 1.

№ опыта	$\tau_3^{общ}$ (сек)	n_3	Время опыта (сек)	$\tau_3^{ср}$ (сек)	$\tau_o^{ср}$ (сек)	τ_n (сек)	n	$k^{ср}$	Результаты расчета
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	12,12	66	60	0,18	0,73	0,91	38	7,789	1,245
2	14,97	62	60	0,24	0,73	0,97	43	5,512	0,965
3	12,28	28	60	0,44	1,7	2,14	28	6,321	1,15
4	8,6	28	60	0,31	1,84	2,25	28	8,107	1,082

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Черников И.А. Особенности наддува топок прерывистым потоком воздуха. Вестник БГТУ, № 2, 2001.-С. 52-56.
- Трембовля В.И. Теплотехнические испытания котельных установок. Москва, Энергоатомиздат, 1991.-С. 236.
- Щекин Р.В. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Кн. 2, Киев, 1976.-С. 88-91.

УДК 534.142

Новосельцев В.Г.

ПРОЦЕСС СЛОЕВОГО ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ

Прообразом явления слоевого пульсирующего горения служит эффект Рийке. В 1859 году Рийке обнаружил, что если достаточно длинную открытую с обоих концов трубу расположить вертикально, а затем поместить в ней на расстоянии около ¼ длины трубы от нижнего конца нагретую до ярко-красного каления частую металлическую сетку, то почти непосредственно вслед за удалением газового пламени, нагревавшего сетку, слышен звук значительной силы, длящийся несколько секунд (то есть в течении всего времени, пока сетка остается горячей). Рийке обнаружил также, что звучание происходит в том случае, если в трубе образуется сквозная тяга (именно для образования тяги и следует ставить трубу вертикально) и в случае возбуждения слышен звук, соответствующий основному тону трубы. Позже опыты Рийке были изменены в том отношении, что сетка нагревалась от источника электрической энергии, и звучание продолжалось неограниченно долго. [1]

В 1968 году В.С. Северянин заменил сетку слоем горящего твердого топлива и получил пульсирующее горение в слое, которое было предложено назвать слоевым пульсирующим горением.

Физическая картина слоевого пульсирующего горения следующая.[2] В любой трубе могут происходить свободные колебания газового столба. Если в момент сжатия нагревать газ, то газовая система способна производить работу расширения, по аналогии с циклом тепловой машины. В момент расширения теплоподвод к газу должен быть минимальным. Проникая через слой, воздух получает тепло при движении снизу вверх и почти не подогревается в противоположном направлении (при смещениях, о которых идет речь). Акустическое смещение максимально по торцам трубы, поэтому эффект переменного теплоподвода максимален в этих местах, однако он должен реализовываться в фазе сжатия, то есть зону горения необходимо размещать между пучностями дав-

ления и скорости (пучность акустических смещений и узел давлений находятся на торце трубы, а узел смещений и пучность давления – посредине трубы). Таким образом, горящее топливо, как и сетка Рийке, должно располагаться на ¼ от нижнего торца трубы.

Целью настоящего исследования процесса слоевого пульсирующего горения является создание на его основе высокоэффективного водонагревателя, пригодного к использованию в системах теплоснабжения.

Предлагается следующая конструкция водонагревателя. Она состоит из жаровой трубы, в которой находятся теплообменные трубки, водяной рубашки, образованной зазором между жаровой трубой и цилиндрическим корпусом. Горелка представляет собой плоское дно с вмонтированными в нее трубочками для подачи воздуха. Снизу водонагревателя расположен воздухопровод и глушитель шума. Для глушения шума по огневой части применена конструкция, работающая по принципу резонатора Гельмгольца, где горлом служат зазоры между теплообменными трубочками, выполненными в виде "беличьего колеса", а объемом резонатора является полость внешнего кожуха. [3]

На газовый поток, колеблющийся в жаровой трубе и воздухопроводе, действуют следующие силы:

- сила, идущая на ускорение газового потока

$$\frac{m \cdot a}{S} = \frac{\rho \cdot V \cdot a}{S} = \frac{\rho \cdot S \cdot L \cdot a}{S} = \rho \cdot L \cdot a =$$

$$\left(\frac{H}{L} \cdot \rho_1 + \frac{h_{мп}}{L} \cdot \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} + \frac{L - H - h_{мп}}{L} \cdot \rho_2 \right) \cdot L \cdot a = (1)$$

$$\left(\left(H + \frac{h_{мп}}{2} \right) \cdot \rho_1 + \left(L - H - \frac{h_{мп}}{2} \right) \cdot \rho_2 \right) \cdot \frac{d^2 x}{dt^2}, \text{Па}$$

Новосельцев Владимир Геннадьевич. Аспирант каф. водоснабжения, водоотведения и теплотехники Брестского государственного технического университета. Беларусь, БГТУ, 224107, г. Брест, ул. Московская, 267.