

Таблица 1 - Исходные данные для определения коэффициента теплопередачи в летнее время

№ участка	D, м, диаметр теплопровода	L, м, длина теплопровода	t _{окр} , °C, температура окружающей среды	t, °C, температура воды в прямом теплопроводе теплосети в начале участка	Q, Вт, тепловые потери на участке
1	2	3	4	5	6
1	0.529	2558	14.3	70.4	362600
2	0.529	2558	14.3	62.2	242462

Для получения значений коэффициентов *m* и *n* на основе уравнения (4) составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} 1.52 = m \cdot (70.4 - 14.3)^n \\ 1.19 = m \cdot (62.2 - 14.3)^n \end{cases} \quad (7)$$

Решая эту систему, получаем *m*=0.003, *n*=1.58.

Выражение для коэффициента теплопередачи имеет вид

$$k = 0.003 \cdot \Delta t^{2.58} \quad (8)$$

С учетом выражения (8) уравнение (3) примет вид

$$\frac{Q_3}{Q_1} = \left(\frac{\Delta t_3}{\Delta t_1} \right)^{2.58} \quad (9)$$

Для температурного графика теплоисточников по "Брест-энерго" на отопительный сезон 1999 – 2000г.г. при температуре теплоносителя в прямом теплопроводе теплосети 120°C и температуре окружающей среды (грунта) 2.6°C (зимние условия) и при температуре теплоносителя 70°C и температуре окружающей среды 14.3°C (летние условия) по уравнению (9) получаем

$$\frac{Q_3}{Q_1} = \left(\frac{120 - 2.6}{70 - 14.3} \right)^{2.58} = 6.8 \quad (10)$$

На основе (10) можно сделать вывод о том, что в зимнее время тепловые потери при транспорте теплоносителя увеличиваются примерно в 6.8 раз и составят 32603006.8 ≈ 22170000 Вт. На выработку такого количества теплоты необходимо 3400 кг у.т./ч, а при цене топлива 0.069 \$/кг это (при применении природного газа) составит 200 \$/ч.

При применении предизолированных теплопроводов тепловые потери при транспортировке теплоносителя ниже. Они могут быть в 5 раз меньше, чем потери теплопроводов с традиционной теплоизоляцией. Во время испытаний было проведено исследование двух участков из предизолированных труб со следующими параметрами (табл. 2)

УДК 621.438

Черников И.А.

ОСОБЕННОСТИ НАДУВА ТОПОК ПРЕРЫВИСТЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

В современной теории горения часто используется понятие воздушных пульсаций. Известно, что пульсирующая подача воздуха в топочный объем интенсифицирует процесс химического реагирования, улучшает теплообмен меж-

Таблица 2 - Параметры участков сети с предизолированными теплопроводами

№ участка	D, м, диаметр теплопровода	L, м, длина теплопровода	t _{окр} , °C, температура окружающей среды	t, °C, температура воды в прямом теплопроводе теплосети в начале участка	Q, Вт, тепловые потери на участке
1	2	3	4	5	6
1	0.219	113	14.3	41	1435
2	0.219	113	14.3	45.8	2080

После подстановки значений этой таблицы в формулу (6) и проведения соответствующих вычислений получаем для участков 1 и 2: *k*₁=0.69, *k*₂=0.85. Анализируя полученные коэффициенты теплопередачи для предизолированных труб и труб с традиционной тепловой изоляцией, можно сделать вывод, что тепловые потери на исследуемых участках у предизолируемых труб ниже, чем у обычных, примерно в 2 раза.

Из результатов испытаний и из выше рассмотренных расчетов видно, что потери при транспортировке теплоносителя по теплосетям составляют большое количество теплоты, на производство которой требуется большой расход топлива.

Для устранения тепловых потерь возможен следующий метод: транспортировка по тепловым сетям теплоносителя с пониженной температурой порядка 50...90°C, а у потребителя предлагается устанавливать доводчик – устройство для подогрева воды до необходимой потребителю температуры [2]. При этой схеме общий расход топлива на центральном источнике теплоты и доводчике меньше, чем в обычной схеме за счет снижения расхода топлива, необходимого для компенсации потерь теплоты при транспортировке. Требования, предъявляемые к доводчику, следующие: простота конструкции, надежность, высокий КПД, дешевизна, большой диапазон регулировки по тепловой мощности и др. [3]

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гусев В.М., Ковалев Н.И., Попов В.П., Потрошков В.А. Теплотехника, отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха// Ленинград, Стройиздат. – 1981. – С. 108-109.
2. Северянин В.С. Централизованное теплоснабжение с доводчиками// Энергетика. (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1998. – №4. – С. 39-43.
3. Новосельцев В.Г. Комбинирование систем централизованного и местного теплоснабжения// Вестник Брестского политехнического института. – 2000. – №2. – С. 66-68.

Черников Игорь Анатольевич. Инженер I категории научно-исследовательского сектора БГТУ.

Брестский государственный технический университет (БГТУ). Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

сложны конструктивно и ненадежны в работе.

В научно-исследовательской лаборатории "Пульсар" Брестского государственного технического университета под руководством Северянина В.С. проводятся исследования нового физического явления, которое при определенных условиях позволяет увеличить количество воздуха, идущего на горение за определенный промежуток времени. В отличие от пульсирующей подачи окислителя (как, например, при пульсирующем горении), нашему процессу более подходит термин *прерывистая* подача.

В процессе прерывистой подачи воздуха имеются интервалы времени полного закрытия воздушного отверстия, из чего можно предположить о невозможности увеличения количества воздуха необходимого на горение. Но оказывается, что прерывистая подача может не только уменьшать, а в определенных условиях и увеличивать количество воздуха по сравнению со стационарным режимом за тот же промежуток времени [1].

По предварительным опытным данным получена экспериментальная зависимость относительного среднего расхода воздуха, которая подтверждает возможность превышения количества воздуха больше единицы в процессе прерывистой подачи воздуха (рис. 1) [1]. Физический смысл данного процесса заключается в том, что при резком закрытии воздушной заслонки, в топочном объеме создается разрежение, обусловленное самотягой или дымососом. При резком открытии воздушной заслонки, создавшееся разрежение засасывает наружный воздух со скоростью потока воздуха, намного большей, чем при стационарном режиме, увеличивая в этот момент и расход воздуха. Увеличение количества воздуха за определенный промежуток времени дает возможность подачи большего количества топлива за тот же промежуток времени, повышая удельную тепловую мощность топки без дополнительных затрат при тех же геометрических параметрах.

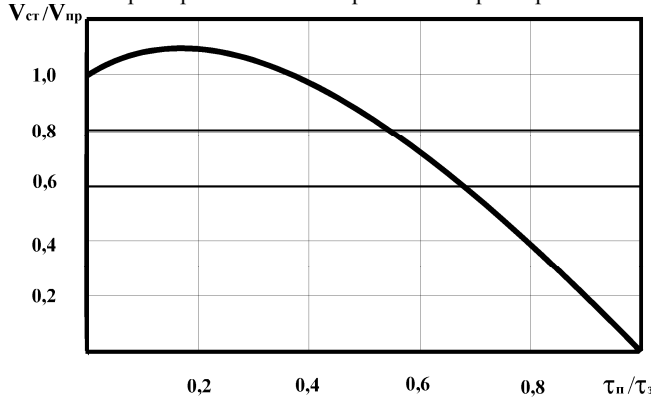


Рисунок 1 - График прерывистой подачи воздуха.

При рассмотрении физики процесса необходимо акцентировать внимание на то, что прерывистая подача воздуха обусловлена резким закрытием и резким открытием входного воздушного отверстия заслонкой. Для анализа расхода воздуха в процессе его прерывистой подачи обратимся к рис. 2. На рисунке показана величина разрежения в топочном объеме S и расхода воздуха V в зависимости от сечения входного воздушного отверстия F , времени открытого τ_o и времени закрытого τ_z положения воздушной заслонки. τ_n – время периода. На графиках S и V пунктиром обозначена величина стационарного режима, ΔS и ΔV – превышение значений относительно стационарного режима.

При организации прерывистой подачи воздуха, когда τ_z в периоде относительно мало (рис. 2а), наблюдаются положительные всплески амплитуды разрежения и расхода воздуха

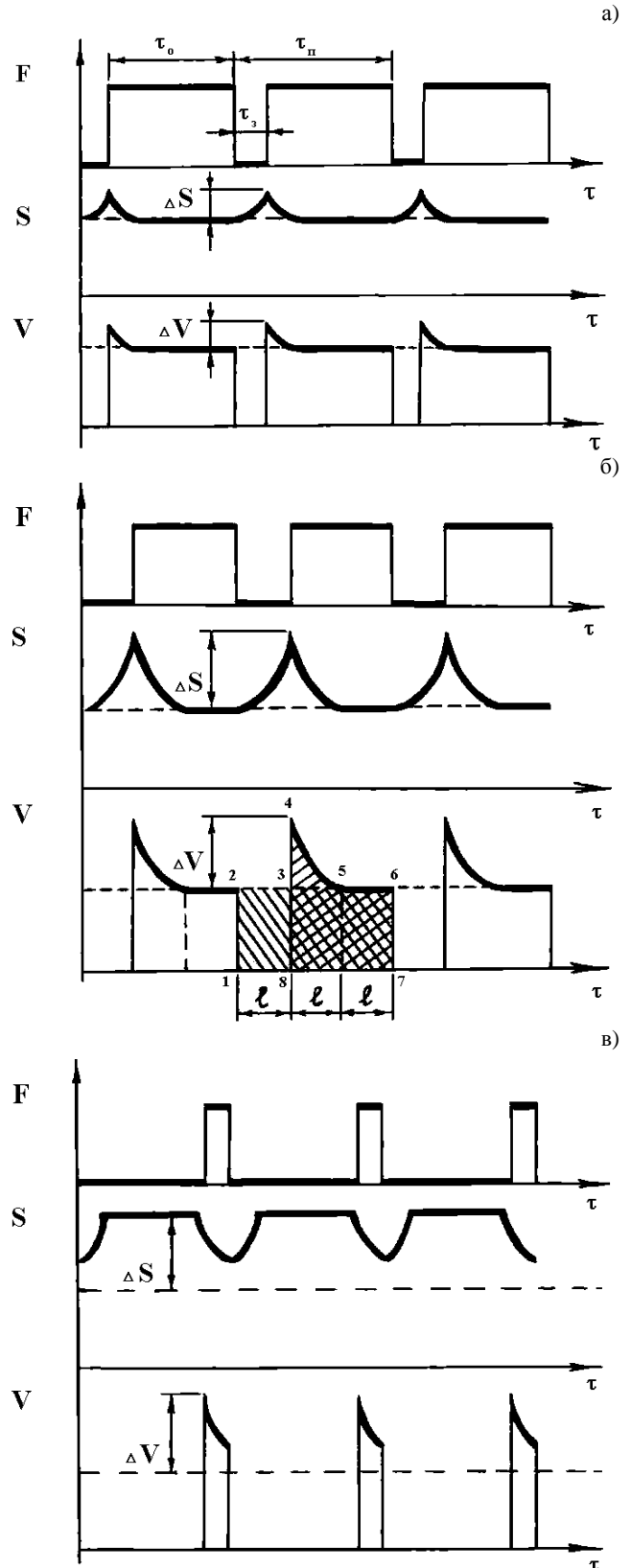


Рисунок 2 - Физика процесса.

относительно стационарного режима с незначительной величиной ΔS и ΔV . Понижение внутритопочного давления до величины ΔP_e (самотяга) или ΔH (дымосос) ведет к понижению расхода до величины стационарного режима.

С увеличением τ_z (рис. 2б) – растет ΔS и ΔV .

При относительно большой величине в периоде τ_3 (рис. 2в) – ΔS достигает максимума, и за малое время открытого положения входного отверстия не успевает понизиться до величины стационарного режима. Аналогичная картина наблюдается с расходом воздуха.

В оптимизации процесса прерывистой подачи воздуха задача состоит в сравнении площади 1-2-6-7 и 8-4-5-6-7 (рис. 2б), т.е. в сравнении интегрального значения расхода воздуха в условиях стационарного режима V_{cm} и расхода воздуха в процессе его прерывистой подачи V_{np}

$$\int V_{cm} \cdot d\tau \text{ и } \int V_{np} \cdot d\tau.$$

Для расчета V_{np} необходимо знать зависимость кривой 4-5 (рис. 2б). В общем случае задача представляется следующим образом (рис. 3): в топку постоянного объема ϑ , с начальным давлением p_1 , через входное отверстие сечением f с коэффициентом сопротивления ζ_f , подается воздух на горение плотностью ρ_e и расходом V_e . Из топки в атмосферу происходит истечение газа плотностью ρ_2 и расходом V_2 через отверстие сечением F с коэффициентом сопротивления ζ_F . По мере уменьшения количества газа внутри емкости, его параметры оказываются переменными по времени. Вопрос состоит в определении мгновенного расхода газа.

Из [2] имеем время истечения газа из емкости постоянно-го объема, через отверстие постоянного сечения

$$\tau = \frac{\vartheta}{F \mu \psi \sqrt{RT}} \cdot \frac{2}{n-1} \cdot \left[\left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right], \quad (1)$$

где n – показатель политропы;

ϑ – объем емкости;

ν – удельный объем;

p – абсолютное давление;

μ – коэффициент расхода отверстия;

F – сечение отверстия;

R – газовая постоянная;

T – температура газа;

ψ – коэффициент равный

$$\psi = \sqrt{\frac{2n}{n-1} \cdot \left[\left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]}.$$

Согласно расчетной схеме (рис.3), аргументы уравнения будут иметь индексы e и 2 .

$$\tau = \frac{\vartheta}{F \mu_2 \psi_2 \sqrt{R_2 T_2}} \cdot \frac{2}{n_2-1} \cdot \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n_2-1}{2n_2}} - 1 \right]. \quad (2)$$

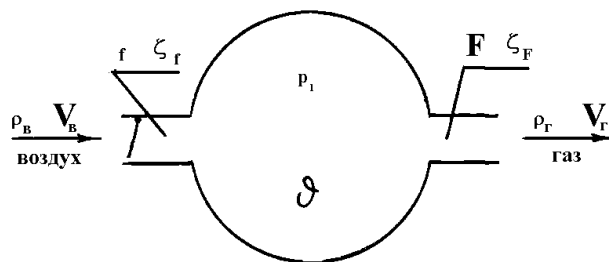


Рисунок 3 - Расчетная схема

$$\text{Учитывая, что } \Delta p = \frac{W^2}{2} \cdot \rho \zeta,$$

где Δp – перепад давления (внутритопочного и наружного);

W – мгновенное значение скорости газа;

ρ – плотность газа;

ζ – коэффициент сопротивления,

(2) запишется

$$\tau = \frac{2\vartheta}{F \mu_2 \psi_2 \sqrt{R_2 T_2} \cdot (n_2 - 1)} \cdot \left[\left(\frac{p_e}{\frac{W_2^2}{2} \cdot \rho_2 \zeta_2} \right)^{\frac{n_2-1}{2n_2}} - 1 \right]. \quad (3)$$

Из уравнения (3) находим p_e (соответственно, все аргументы будут иметь индекс e)

$$p_e = \frac{W_e^2}{2} \rho_e \zeta_e \cdot \left[\frac{\tau f \mu_e \psi_e \sqrt{R_e T_e} \cdot (n_e - 1)}{2\vartheta} + 1 \right]^{\frac{2n_e}{n_e-1}}. \quad (4)$$

Тогда (3) с учетом (4) будет равно

$$\tau = \frac{2\vartheta}{F \mu_2 \psi_2 \sqrt{R_2 T_2} \cdot (n_2 - 1)} \times \left[\frac{\frac{W_e^2}{2} \rho_e \zeta_e \cdot \left[\frac{\tau f \mu_e \psi_e \sqrt{R_e T_e} \cdot (n_e - 1)}{2\vartheta} + 1 \right]^{\frac{2n_e}{n_e-1}}}{\frac{W_2^2}{2} \rho_2 \zeta_2} - 1 \right]. \quad (5)$$

Из (5) вычисляем мгновенную скорость воздушного потока

$$W_e = \sqrt{\frac{W_2^2 \rho_2 \zeta_2 \cdot \left[\frac{\tau_3 F \mu_2 \psi_2 \sqrt{R_2 T_2} \cdot (n_2 - 1)}{2\vartheta} + 1 \right]^{\frac{2n_2}{n_2-1}}}{\rho_e \zeta_e \cdot \left[\frac{\tau f \mu_e \psi_e \sqrt{R_e T_e} \cdot (n_e - 1)}{2\vartheta} + 1 \right]^{\frac{2n_e}{n_e-1}}}}. \quad (6)$$

С учетом зависимости расхода воздуха $V = f \cdot W_e$, получим

$$V = \frac{I}{3}(V_{np} + V_{cm}) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{2V_{np} \cdot \text{Sin}(\pi n) \left[\frac{V_{np}}{V_{cm}} \left(\frac{\text{Sin}(2\pi n)}{\text{Sin}(\pi n)} - 1 \right) + \frac{\text{Sin}(2\pi n)}{\text{Sin}(\pi n)} \left(\frac{\text{Sin}(3\pi n)}{\text{Sin}(2\pi n)} - 1 \right) \right]}{3\pi n} \times \right. \\ \left. \times \text{Cos} \left(\frac{\pi}{l} \tau \right) + \frac{2V_{np} \cdot \text{Cos}(\pi n) \left[\frac{V_{np}}{V_{cm}} \left(1 - \frac{\text{Cos}(2\pi n)}{\text{Cos}(\pi n)} \right) + \frac{\text{Cos}(2\pi n)}{\text{Cos}(\pi n)} \left(1 - \frac{\text{Cos}(3\pi n)}{\text{Cos}(2\pi n)} \right) \right]}{3\pi n} \cdot \text{Sin} \left(\frac{\pi n}{l} \tau \right) \right\}. \quad (9)$$

$$V = \frac{I}{3}(V_{np} + V_{cm}) + \left\{ \frac{2V_{np} \cdot \text{Sin}(\pi) \left[\frac{V_{np}}{V_{cm}} \left(\frac{\text{Sin}(2\pi)}{\text{Sin}(\pi)} - 1 \right) + \frac{\text{Sin}(2\pi)}{\text{Sin}(\pi)} \left(\frac{\text{Sin}(3\pi)}{\text{Sin}(2\pi)} - 1 \right) \right]}{3\pi} \times \right. \\ \left. \times \text{Cos} \left(\frac{\pi}{l} \tau \right) + \frac{2V_{np} \cdot \text{Cos}(\pi) \left[\frac{V_{np}}{V_{cm}} \left(1 - \frac{\text{Cos}(2\pi)}{\text{Cos}(\pi)} \right) + \frac{\text{Cos}(2\pi)}{\text{Cos}(\pi)} \left(1 - \frac{\text{Cos}(3\pi)}{\text{Cos}(2\pi)} \right) \right]}{3\pi} \cdot \text{Sin} \left(\frac{\pi}{l} \tau \right) \right\} + \\ + \left\{ \frac{2V_{np} \cdot \text{Sin}(2\pi) \left[\frac{V_{np}}{V_{cm}} \left(\frac{\text{Sin}(4\pi)}{\text{Sin}(2\pi)} - 1 \right) + \frac{\text{Sin}(4\pi)}{\text{Sin}(2\pi)} \left(\frac{\text{Sin}(6\pi)}{\text{Sin}(4\pi)} - 1 \right) \right]}{6\pi} \cdot \text{Cos} \left(\frac{2\pi}{l} \tau \right) + \right. \\ \left. + \frac{2V_{np} \cdot \text{Cos}(2\pi) \left[\frac{V_{np}}{V_{cm}} \left(1 - \frac{\text{Cos}(4\pi)}{\text{Cos}(2\pi)} \right) + \frac{\text{Cos}(4\pi)}{\text{Cos}(2\pi)} \left(1 - \frac{\text{Cos}(6\pi)}{\text{Cos}(4\pi)} \right) \right]}{6\pi} \cdot \text{Sin} \left(\frac{2\pi}{l} \tau \right) \right\} + \\ + \left\{ \frac{2V_{np} \cdot \text{Sin}(3\pi) \left[\frac{V_{np}}{V_{cm}} \left(\frac{\text{Sin}(6\pi)}{\text{Sin}(3\pi)} - 1 \right) + \frac{\text{Sin}(6\pi)}{\text{Sin}(3\pi)} \left(\frac{\text{Sin}(9\pi)}{\text{Sin}(6\pi)} - 1 \right) \right]}{9\pi} \cdot \text{Cos} \left(\frac{3\pi}{l} \tau \right) + \right. \\ \left. + \frac{2V_{np} \cdot \text{Cos}(3\pi) \left[\frac{V_{np}}{V_{cm}} \left(1 - \frac{\text{Cos}(6\pi)}{\text{Cos}(3\pi)} \right) + \frac{\text{Cos}(6\pi)}{\text{Cos}(3\pi)} \left(1 - \frac{\text{Cos}(9\pi)}{\text{Cos}(6\pi)} \right) \right]}{9\pi} \cdot \text{Sin} \left(\frac{3\pi}{l} \tau \right) \right\} \dots \quad (10)$$

$$V = f \cdot \sqrt[2n_2]{\frac{W_2^2 \rho_2 \mathcal{S}_2 \cdot \left[\frac{\tau_3 F \mu_2 \psi_2 \sqrt{R_2 T_2} \cdot (n_2 - 1)}{2\vartheta} + 1 \right]}{\rho_6 \mathcal{S}_6 \cdot \left[\frac{\tau f \mu_6 \psi_6 \sqrt{R_6 T_6} \cdot (n_6 - 1)}{2\vartheta} + 1 \right]}} \quad (7)$$

Как видно на рис. 2б, функция $V = f(\vartheta)$ периодическая, поэтому целесообразно ее представить в виде ряда Фурье, т.к. данная функция является кусочно-монотонной и ограниченной на отрезке $[0; 3\ell]$, ее ряд Фурье имеет вид:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cdot \text{Cos} \left(\frac{\pi n}{\ell} \cdot x \right) + b_n \cdot \text{Sin} \left(\frac{\pi n}{\ell} \cdot x \right) \right], \quad (8)$$

$$a_n = \frac{2}{3\ell} \cdot \int_0^{3\ell} f(x) \cdot \cos\left(\frac{\pi n}{\ell} \cdot x\right) dx,$$

$$b_n = \frac{2}{3\ell} \cdot \int_0^{3\ell} f(x) \cdot \sin\left(\frac{\pi n}{\ell} \cdot x\right) dx,$$

где a_0, a_n, b_n – коэффициенты ряда Фурье;

ℓ – интервалы периода;

n – целое число от 1 до ∞ .

Находим разложение в ряд Фурье периодической функции с периодом 3ℓ .

$$V(\tau) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \tau \leq \ell; \\ V_{np}, & \ell < \tau \leq 2\ell; \\ V_{cm}, & 2\ell < \tau \leq 3\ell. \end{cases}$$

$$\frac{2}{3\ell} \cdot \left(\int_0^{\ell} 0 \cdot d\tau + \int_{\ell}^{2\ell} V_{np} \cdot d\tau + \int_{2\ell}^{3\ell} V_{cm} \cdot d\tau \right) = \frac{2}{3} \cdot (V_{np} + V_{cm}).$$

Находим коэффициенты ряда

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{3} \cdot (V_{np} + V_{cm});$$

$$a_n = \frac{2V_{np} \cdot \sin(\pi n)}{3\pi n} \times$$

$$\times \left[\frac{V_{np}}{V_{cm}} \cdot \left(\frac{\sin(2\pi n)}{\sin(\pi n)} - 1 \right) + \frac{\sin(2\pi n)}{\sin(\pi n)} \cdot \left(\frac{\sin(3\pi n)}{\sin(2\pi n)} - 1 \right) \right]$$

$$b_n = \frac{2V_{np} \cdot \cos(\pi n)}{3\pi n} \times$$

$$\times \left[\frac{V_{np}}{V_{cm}} \cdot \left(1 - \frac{\cos(2\pi n)}{\cos(\pi n)} \right) + \frac{\cos(2\pi n)}{\cos(\pi n)} \cdot \left(1 - \frac{\cos(3\pi n)}{\cos(2\pi n)} \right) \right]$$

Подставив полученные коэффициенты в ряд (8) получим (9).

Подставим значения $n=1, 2, 3, \dots$ и получим искомый ряд Фурье (10).

Выражение (10) позволяет определить количество воздуха при его прерывистой подаче в топку.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Severyanin V.S. Peculiarities of furnace process with broken air supply// Materials of the III International school-seminar. Modern problems of combustion and its applications. Belarussian section of the combustion institut National Academy of sciences of republic of Belarus A.V. Luikov heat and mass transfer institute// Minsk. – 1999. – 128 page.-The bibliography: page 57-60.
2. Т.Н. Андрианова и другие. Сборник задач по технической термодинамике. М.: "Энергия". – 1971. – С. 262. Библиогр.: С. 128.

УДК 691:699.86

Никитин В.И., Ракецкий В.М., Ланко А., Прусел И.А.

ИМИТАЦИЯ ТЕПЛО- И ВЛАГОПЕРЕНОСА В ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

В комплексе мероприятий по энергосбережению важную роль играют работы, направленные на снижение потерь тепловой энергии через теплоизолированные поверхности зданий, сооружений, теплопроводов и оборудования. Снижения этих потерь можно добиваться путем перехода на более жесточенные нормативы теплопотерь и использования высокоэффективных теплоизоляционных материалов. При этом для принятия обоснованных решений целесообразно опираться на количественные оценки, получаемые с использованием методов расчета, которые в состоянии более полно учитывать особенности процесса переноса тепла и влаги в теплоизоляционных материалах при случайных воздействиях окружающей среды.

Сейчас на базе существующего математического описания процесса тепло- и влагопереноса в капиллярно-пористых материалах и современной вычислительной техники имеется возможность разрабатывать диалоговые системы имитации. С

помощью таких систем, являющихся средством выполнения вычислительного эксперимента, можно получать сведения о состоянии изучаемого процесса в определенные моменты времени, углублять свои знания, совершенствовать саму систему имитации, накапливать данные для принятия технического решения или разработки более точного инженерного метода расчета.

Одну из возможных инженерных реализаций этого подхода продемонстрируем на примере имитации процесса переноса тепла и влаги через многослойные цилиндрические стенки из высокопористых материалов, изолирующих поверхности круговых цилиндров. Заметим, что результаты, полученные для цилиндрических стенок большого радиуса кривизны, можно распространить и на плоские стенки.

Нестационарные процессы переноса тепла и влаги в капиллярно-пористых материалах взаимно связаны между собой и при решении практических задач могут быть описаны

Никитин Вадим Иванович. Д.т.н., профессор каф. строительной механики БГТУ.

Ракецкий Валерий Михайлович. К. ф.-м. наук, доцент, зав. каф. вычислительной техники и прикладной математики. Брестский государственный технический университет (БГТУ). Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Ланко Андрей. Профессор, д.т.н., проректор по сотрудничеству и промоции, зав. каф. железобетонных и стеновых конструкций Белостокской Политехникой (РП).

Прусел Иоланта Анна. К.т.н., адъюнкт каф. железобетонных и стеновых конструкций Белостокской Политехникой (РП).