

ПРОЦЕССЫ КОНДЕНСАЦИИ И СУШКИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ДВУХСЛОЙНОЙ ДЫМОВОЙ ТРУБЕ

¹Конон П. Н., ²Поддубная М. А.

¹УО «Белорусский государственный университет», Минск

²УО «Полоцкий государственный университет», Полоцк

Республика Беларусь находится в таком климатическом регионе, где различия в потреблении энергии в зимний и летний периоды существенны. Поэтому создание надежных энергетических аппаратов, в том числе высотных дымовых труб ТЭС и ГРЭС, в условиях частых пусков и остановок котельного оборудования [4], при которых необходимо рассматривать нестационарные условия тепло- и массообмена в конструкциях труб, учитывающие перенос влаги в виде конденсата и интенсивные фазовые превращения как на поверхности конструкций, так и поровой структуре материала футеровки [6], является значимой задачей. Кроме того, многократные циклы «нагрев-выдержка-охлаждение» оказывают наиболее существенное влияние на параметры напряженно-деформированного состояния конструкции.

Постановка задачи. Исследуем нестационарные процессы тепломассопереноса в двухслойной дымовой трубе во время подъема температуры дымовых газов. Внутренний слой пористый и называется футеровкой, внешний слой – железобетонный. Подробная постановка задачи для двухслойной и многослойной конструкции дымовой трубы дана в работах [7, 8]. В данной работе особое внимание будет уделено образованию пленки конденсата, оценке ее толщины, влиянию конденсации на температурное поле в конструкции, процессу просушивания материала футеровки.

Так как труба имеет форму усеченного конуса, то это приводит к постановке задачи в цилиндрической системе координат с учетом независимости процессов переноса относительно окружной координаты. Однако в силу того, что радиус трубы достаточно большой, и температура дымовых газов в пределах одной зоны порядка 25 м по высоте меняется незначительно на 2–3 °С, будем рассматривать нестационарные процессы тепло- и массообмена, зависящие от координаты x , что показано на рисунке 1. При повышении температуры дымовых газов из холодного состояния происходят процессы конденсации водяных паров и паров серной кислоты. Потоки этого агрессивного компонента через поверхность футеровки составляют незначительную величину и их влияние на температурно-влажностный режим не учитывается. Образующийся конденсат частично проникает в поры футеровки, основная же часть стекает по вертикальной, длинной, неровной стенке. Термическим сопротивлением пленки конденсата в модели пренебрегаем. Процессы конденсации происходят при температуре дымовых газов ниже точки росы, то есть когда давление водяных паров превышает давление насыщения на внутренней поверхности футеровки. В дальнейшем начинается процесс испарения – сушка увлажненной части трубы [9].

Температура и давление дымовых газов считаются известными функциями времени. В определенном сечении трубы $y = const$ можно считать, что уравнение поверхности пленки есть $x = h(t)$. Выделим следующие области при исследовании тепло- и массопереноса: 1 – область $x < h(t)$ – поток перегретой паровоздушной смеси, которая конденсируется на пористой поверхности; 2 – область $h(t) < x < 0$ – сплошная жидкая пленка, стекающая по неровной вертикальной поверхности; 3 – область $0 < x < \delta_1$ – ка-

пиллярно-пористая среда, в которой исследуется тепло- и влагоперенос; 4 – область $\delta_1 < x < \delta_1 + \delta_2$ – твердое тело, в котором рассматривается теплоперенос.

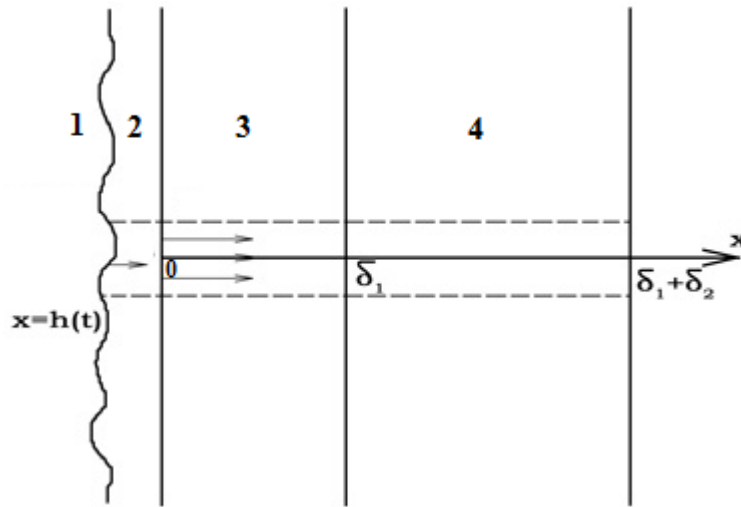


Рис. 1. К исследованию тепломассопереноса в двухслойной конструкции трубы

В области 2 имеем движение жидкой пленки конденсата под действием силы тяжести по неровной поверхности. Эта задача имеет свой гидродинамический интерес. Граница раздела фаз $x = h(t)$ находится после решения задачи тепломассообмена по скорости конденсации $g_k(t)$, определяемой как количество сконденсировавшейся жидкости на единице площади поверхности в единицу времени.

В области 3 рассматривается диффузия жидкости через пористый скелет тела, а также капиллярное впитывание. Термическим сопротивлением пленки конденсата в модели пренебрегаем. Определим удельное влагосодержание U как количество жидкости в единице объема скелета пористого тела. Полная модель процессов тепломассопереноса дана в работе [7]. В данном исследовании представлены новые результаты исследования по модели, рассмотренной в работе [8], усложненной процессом сушки.

Модель включает уравнения диффузии тепла $T(x,t)$ и влаги $U(x,t)$ с переменными коэффициентами переноса. Перенос влаги рассматривается только в пористом слое футеровки толщиной δ_1 . На границе $x=0$ для температуры задаются граничные условия третьего рода с учетом конденсации на свободной поверхности, учитывая, что температура дымовых газов линейно изменяется со временем. На внешней границе $x = \delta_1 + \delta_2$ задаются граничные условия теплообмена третьего рода. На поверхности соприкосновения слоев ставятся условия равенства температур и потоков тепла.

Граничные условия для определения влажностного поля определяются из следующих соображений. Если поток влаги $-a_m \partial U / \partial x$ не превосходит интенсивности конденсации $g_k(t)$, то на границе $x=0$ задается значение влагосодержания, соответствующее полному насыщению. Если же поток влаги больше интенсивности конденсации, то на границе ставится условие равенства потока влаги и интенсивности конденсации. Описанные уравнения, граничные и начальные условия имеют вид:

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T,U) \frac{\partial T}{\partial x} \right],$$

$$\lambda(T,U) = \begin{cases} \lambda_1(T,U), & 0 \leq x \leq \delta_1 \\ \lambda_2(T), & \delta_1 \leq x \leq \delta_1 + \delta_2 \end{cases}, \quad c\gamma = \begin{cases} c_1\gamma_1, & 0 \leq x \leq \delta_1 \\ c_2\gamma_2, & \delta_1 \leq x \leq \delta_1 + \delta_2 \end{cases}. \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[a_m(U) \frac{\partial U}{\partial x} \right], \quad 0 \leq x \leq \delta_1. \quad (2)$$

$$-\lambda_1(T,U) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_1 [T_2 - T(0,t)] + g_\kappa(t)r, \quad T_2 = T_g + kt. \quad (3)$$

$$\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=\delta_1} = 0, \quad [T]_{x=\delta_1} = 0. \quad (4)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1+\delta_2} = \alpha_2 [T(\delta_1 + \delta_2, t) - T_g]. \quad (5)$$

$$U(0,t) = U_{nn}, \quad -a_m(U) \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} \leq g_\kappa(t),$$

$$-a_m(U) \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = g_\kappa(t), \quad -a_m(U) \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} > g_\kappa(t). \quad (6)$$

$$U|_{x=\delta_1} = U_p. \quad (7)$$

$$T(x,0) = T_g, \quad U(x,0) = U_0. \quad (8)$$

Для расчета коэффициента теплоотдачи α_1 от потока турбулентного течения дымовых газов к футеровке использовано уравнение [3]

$$Nu = 0.032 Re^{0.8} Pr^{0.3} \left(\frac{d}{h} \right)^{0.054}. \quad (9)$$

Интенсивность конденсации $g_\kappa(t)$ определяется формулой:

$$g_\kappa(t) = g_\kappa(T(0,t)) = \beta \{ P_n(t) - P_H[T(0,t)] \}. \quad (10)$$

Для определения давления насыщения P_H на стенке при $x=0$ использовалась эмпирическая формула [6]:

$$P_H(T) = \begin{cases} 165914 e^{\frac{7.331(T-374)}{T+273}}, & T > 100 \text{ }^\circ\text{C} \\ 760 e^{\frac{13.963(T-100)}{T+273}}, & T < 100 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}. \quad (11)$$

Если давление насыщения на стенке $x=0$ сравнивается с давлением паровоздушной смеси P_n , то конденсация заканчивается. Из этого условия можно определить время конденсации t_k .

При $t > t_k$ процесс конденсации прекращается и начинается сушка увлажненной футеровки. Модель этого процесса описывается на основе теории углубления фронта фазового превращения свободной влаги [9]. Подвижная граница фазового перехода $x = \xi(t)$ имеет температуру равную температуре кипения воды T_n , что показано на рисунке 2. На этой границе происходит переход от жидкого состояния в парообразное, на что требуется теплота перехода r (ккал/кг). На границе раздела $x = \xi(t)$ выполнено условие Стефана [1]

$$\lambda_{11} \frac{\partial T_{11}}{\partial x} - \lambda_{12} \frac{\partial T_{12}}{\partial x} = -rU(t) \frac{d\xi}{dt}. \quad (12)$$

Здесь $T_{11}(x,t)$, λ_{11} – температура и коэффициент теплопроводности сухой фазы 1 футеровки $T_{12}(x,t)$, λ_{12} – эти же величины для влажной фазы 2 футеровки. Поля температур $T_{11}(x,t)$ и $T_{12}(x,t)$ определяются решением уравнения (1).

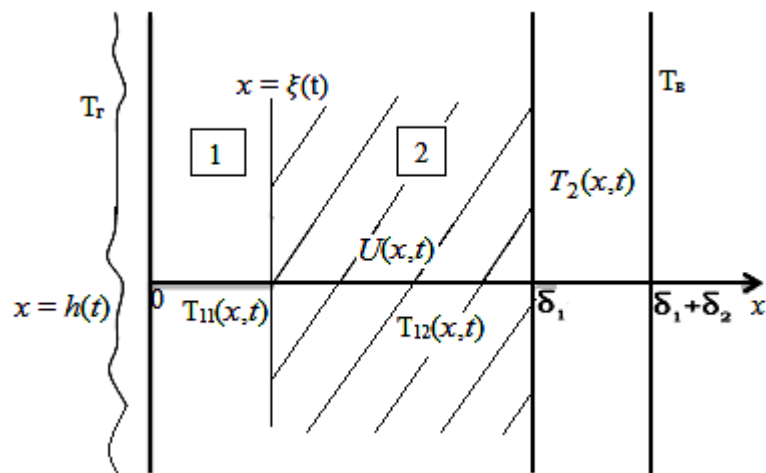


Рис. 2. Схема сушки в футеровке

В соотношениях (1–12) обозначены: Nu – число Нуссельта, $Nu = \alpha_1 d / \lambda_2$; Re – число Рейнольдса, $Re = wd / \nu$; Pr – число Прандтля при средней температуре газов, $Pr = \nu / a$; d – внутренний диаметр трубы, м; h – высота рассматриваемой зоны, м; λ_T – теплопроводность дымовых газов, ккал/(м·ч·°C); w – средняя скорость газа, м/ч; ν – коэффициент кинематической вязкости газа, м²/ч; a – коэффициент теплопроводности дымовых газов, м²/ч; δ_1, δ_2 – толщина футеровки и железобетонного ствола соответственно, м; $\lambda(T, U)$ – коэффициент теплопроводности, вообще говоря, функция температуры T (°C) и влагосодержания U (кг/м³), ккал/(м·ч·°C); c – теплоемкость материала, ккал/(кг·°C); γ – объемная масса, кг/м³; α_1, α_2 – коэффициент теплоотдачи, соответственно, от газа к внутренней поверхности трубы и от наружной поверхности трубы к воздуху, ккал/(м²·ч·°C); r – теплота фазового

да, ккал/кг; $a_m(U)$ – коэффициент диффузии влаги, функция влагосодержания, м²/ч; T_z, T_g – температура, соответственно, дымовых газов в трубе и наружного воздуха, °С; $g_k(t)$ – массовая скорость конденсации, кг/(м² · ч); β – коэффициент чп, кг/(м² · ч · мм. рт. ст.); P_n – парциальное давление пара, мм. рт. ст.; $P_n[T(0, t)]$ – давление насыщения, известная функция температуры, мм. рт. ст.; k – скорость подъема температур дымовых газов, °С/ч; $U_p = U_0$ – равновесное значение, кг/м³.

Соотношения (1–12) определяют постановку задачи о совместном тепло- и массообмене в конструкции двухслойной трубы с учетом конденсации парогазовой смеси и процесса сушки увлажненной футеровки. При постановке задачи для многослойной конструкции необходимо учесть равенство потоков тепла и влаги на границе слоев.

Результаты численных расчетов. Численным методом конечных разностей с использованием консервативных схем проведен расчет полей температур, влагосодержания, тепловых и влажностных потоков через поверхность, а также интенсивности конденсации на внутренней поверхности дымовой трубы при нестационарном температурном режиме движения дымовых газов.

Нестационарный режим работы дымовой трубы при расчетах соответствовал одному из реальных условий их эксплуатации и задавался следующим образом: подъем температуры дымовых газов T_g от $T_B = -38$ °С до $T_M = 160$ °С по линейному закону со скоростью $k = 10$ °С/ч или 30 °С/ч, выдержка до стационарного режима при $T_z = T_M$, охлаждение от $T_z = T_M$ до $T_B = -38$ °С линейно со скоростью $V = 30$ °С/ч, дальнейшее охлаждение трубы при $T_z = T_g$.

Численные расчеты приведены при следующих исходных данных. Толщины стенок: $\delta_1 = 0,2$ м, $\delta_2 = 0,62$ м; теплоемкости материалов футеровки и железобетонного ствола: $c_1 = c_2 = 0,2$ ккал/(кг · °С); объемные массы: $\gamma_1 = 1700$ кг/м³, $\gamma_2 = 2200$ кг/м³; коэффициенты теплоотдачи, соответственно, от газа к внутренней поверхности трубы и от наружной поверхности трубы к воздуху: $\alpha_2 = 20$ ккал/(м² · ч · °С), $\alpha_1 = 17$ ккал/(м² · ч · °С); теплота фазового перехода: $r = 540$ ккал/кг; равновесное значение влагосодержания: $U_p = 25$ кг/м³, влагосодержание при полном намокании: $U_{п.н.} = 200$ кг/м³; максимальное давление водяных паров:

$P_n = 150$ мм. рт. ст.; коэффициент массообмена: $\beta = 0.71$ кг/(м² · ч · мм. рт. ст.); коэффициент теплопроводности футеровки из кирпича, как функция температуры: $\lambda_1(T) = 0.33 + 2.03 \times 10^{-3} \cdot T$ ккал/(м · ч · °С); коэффициент теплопроводности железобетонного ствола: $\lambda_2 = 1.33$ ккал/(м · ч · °С).

На рисунке 3 представлены поля температур при нестационарной работе дымовой трубы в различные моменты времени $t = 5$ ч, $t = 8$ ч, $t = 15$ ч, $t = 20$ ч, $t = 48$ ч с начала прогрева дымовой трубы со скоростью 30 °С/ч и выдержке до стационарного режима. Штриховой линией отражено влияние влажностного поля на температурное. При учете переноса влаги градиенты температур в слое значительно больше, что неблагоприятно сказывается на напряженном состоянии в конструкции.

Наибольший перепад в футеровке наблюдается при росте температуры дымовых газов и при указанных выше данных более 140 °С, что существенно превышает допустимое значение в 80 °С, что нарушает на некоторое время рекомендуемый режим эксплуатации.

В настоящее время при разработке проектов дымовых труб с целью повышения их надежности и долговечности перепад температур по футеровке из кислотоупорного кирпича рекомендуется принимать равным 80 °С [5, 11]. При этом температура внутренней поверхности железобетонного ствола не должна превышать 100 °С. Как показывает анализ численных расчетов для достижения этих целей режим разогрева должен быть достаточно плавным и медленным с промежуточной выдержкой температуры газов. При этом рекомендуемый температурный режим – подъем температуры газов не должен превышать скорости 5 °С/ч, а в зимнее время должна быть выдержка в стационарном режиме в течение суток при температуре 100 °С. Только проведя сушку трубы, приступают к ее эксплуатации.

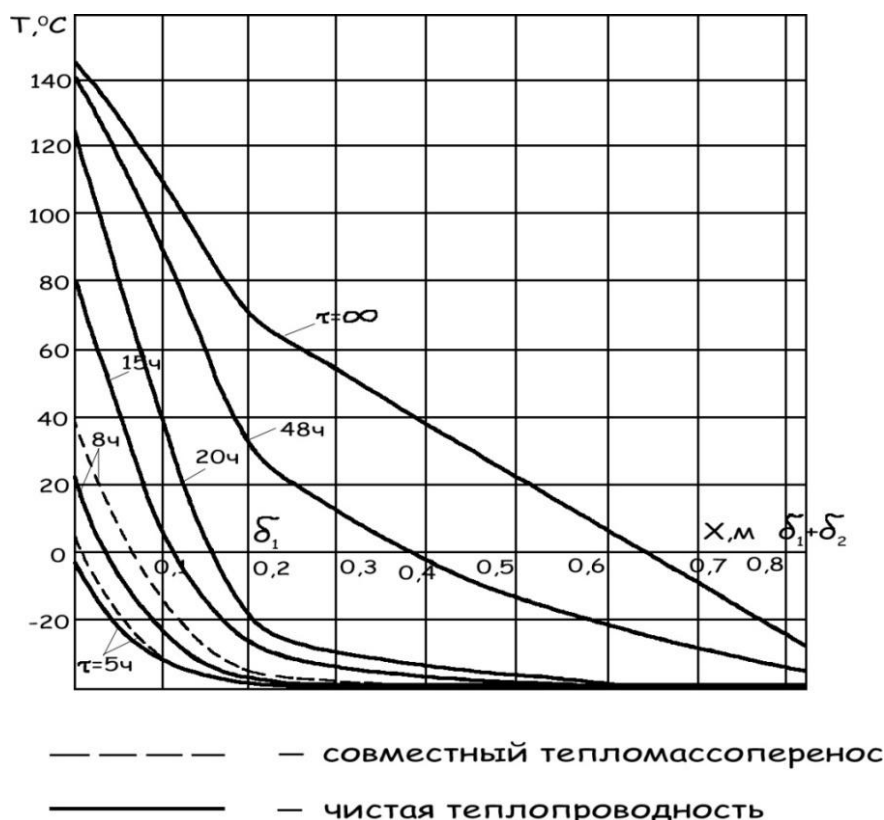


Рис. 3. Распределение температур двухслойной трубы при нестационарной работе в моменты времени $t = 5$ ч, $t = 8$ ч, $t = 15$ ч, $t = 20$ ч, $t = 48$ ч, $t = \infty$. Сплошная линия – чистая теплопроводность, штриховая – совместный теплоперенос

Для расчета поля влагосодержания использовалась зависимость коэффициента диффузии влаги $a_m(U)$, заданная дискретными значениями из таблицы 1. При проведении численных расчетов зависимость $a_m(U)$ аппроксимировалась линейной интерполяцией.

Таблица 1 – Зависимость коэффициента диффузии влаги a_m от влагосодержания U

u , кг/м ³	20	40	60	80	100	120	40	60	80	200
$a_m \cdot 10^5$, м ² /ч	2	2	4	6	10	20	80	100	20	3

Как показывают расчеты влажностных полей по предложенной модели влагосодержание приближается к равновесному равному $U_p = 25 \text{ кг/м}^3$ в течение 23 часов после начала эксплуатации трубы.

Для определения толщины пленки конденсата, стекающей по вертикальной пористой стенке дымовой трубы, приближенно принимается следующая модель. Схема течения изображена на рисунке 2. Считаем, что пленка образуется вследствие конденсации и что часть жидкости проникает в футеровочный слой толщиной δ_1 . Тогда уравнение, определяющее изменение толщины слоя конденсата плотности ρ_κ в данном сечении, запишется в виде

$$\frac{dh}{dt} = \frac{g_\kappa}{\rho_\kappa} - \frac{g_{nom}(t)}{\rho_\kappa}, \quad g_{nom}(t) = -a_m \left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=0}. \quad (12)$$

Учитывая соотношение (12), получим:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\beta\{P_n(t) - P_n[T(0,t)]\}}{\rho_\kappa} + \frac{1}{\rho_\kappa} \left(a_m \frac{\partial U}{\partial x}(0,t) \right). \quad (13)$$

Расчеты интенсивности конденсации показывают, что $g_{nom} \ll g_\kappa$ практически во все время подъема температуры газов. Тогда максимальную толщину пленки конденсата на неподвижной поверхности можно оценить выражением

$$h_{max} = \int_0^{t_\kappa} \frac{g_\kappa}{\rho_\kappa}(t) dt, \quad (14)$$

где t_κ – время конденсации.

Вычисления показывают [7], что толщина пленки конденсата при скорости подъема температуры газов $k = 30 \text{ }^\circ\text{C/ч}$ не превышает $h_{max} = 2 \text{ мм}$, а при более длительной конденсации при $k = 10 \text{ }^\circ\text{C/ч}$ толщина $h_{max} = 4 \text{ мм}$, что согласуется с результатами в книге [2]. Зная величину интенсивности конденсации и площадь поверхности конденсации, т.е. площадь внутренней поверхности трубы, приближенно можно определить общее количество конденсата по формуле

$$M = 2\pi R_{cp} H g_{k_{cp}} t_k, \quad (15)$$

где R_{cp} – средний радиус трубы; H – высота трубы; $g_{k_{cp}}$ – средняя интенсивность конденсации.

Согласно результатам работы [7] средняя интенсивность конденсации при скорости подъема температуры дымовых газов $V_{II} = 10 \text{ }^\circ\text{C/ч}$ составляет $0,3 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$ в течение 11 часов. Вычисления по формуле (15) показывают, что при нестационарной работе трубы при ее разогреве в процессе конденсации могут образовываться тонны воды, которую необходимо отводить.

После окончания процесса конденсации начинается сушка увлажненной футеровки толщиной δ_1 . Для оценки времени сушки используем решение задачи Стефана о фазовом переходе. Рассмотрим задачу о движении фронта превращения воды в пар в пористой футеровке дымовой трубы. Будем считать, что в начальный момент произошло

полное намокание поверхности, т. е. $u(x, 0) = const = U_0$. На границах стенки задаются граничные условия первого рода. Известно аналитическое решение задачи, когда $\delta_1 \rightarrow \infty$ [1]. Поэтому представленное ниже решение достаточно точно, если $\xi \ll \delta_1$. С течением времени процесс образования новой сухой фазы 1 захватывает все больший объем исходной фазы, количество новой фазы увеличивается, а граница раздела фаз ξ передвигается в объем исходной увлажненной фазы 2, как на рисунке 2. Если начальная температура T_e равна температуре фазового перехода T_n , то граница раздела фаз перемещается по закону

$$\xi = \beta\sqrt{t}, \quad \beta = \sqrt{\frac{2\lambda_1(T_e - T_n)}{rU_0}}. \quad (16)$$

Область толщиной δ_0 будет полностью просушена, если граница $\xi = \delta_0$. Отсюда можно получить время сушки $t_{\text{суш}}$ стенки толщиной δ_0

$$t_{\text{суш}} = \frac{rU_0\delta_0^2}{2\lambda_1(T_e - T_n)}. \quad (17)$$

Формула (17) получена при значениях δ_0 значительно меньших значения всей области сушки δ_1 . Для всей области формула (17) является приближенной. Проведем расчеты по формуле (17) при следующих данных: $\delta_1 = 0,2$ м; $c_1 = 0,2$ ккал/(кг · °С); $\rho = 1000$ кг/м³; $T_r = 160$ °С, $T_n = 100$ °С, $r = 540 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$; $\lambda_1 = 0,53$ ккал/м · ч°С, $U_0 = 100$ кг/м³. Расчеты позволяют получить оценку времени сушки в 40 часов, что согласуется с рекомендуемыми в инструкциях значениями [9, 11].

Заключение. Построена модель совместного тепло- и массопереноса с переменными теплофизическими характеристиками с учетом конденсации на внутренней поверхности трубы, определения пленки конденсата, диффузного проникновения влаги вглубь футеровочного слоя и сушки увлажненного пористого скелета трубы.

Численным методом конечных разностей с использованием консервативных разностных схем исследована задача определения нестационарных температурных и влажностных полей в двухслойной трубе конструкции в период пуска и устойчивой работы. Определены наиболее опасные зоны с большими градиентами температур и время возвращения дымовых газов на установившийся режим работы. Разработана приближенная модель определения толщины пленки при нестационарном тепло- и массообмене. Оценено значение максимальной толщины пленки конденсата и общего количества выпавшего конденсата во время запуска холодной дымовой трубы. Получена инженерная формула определения времени сушки увлажненного скелета трубы.

Результаты работы по нестационарному расчету тепло- и массообмена могут быть использованы проектными организациями при совершенствовании конструкций и выборе режимов эксплуатации высотных дымовых труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – Москва: Наука, 1977. – 740 с.
2. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – Москва: Атомиздат, 1979. – 659 с.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
4. Шишков И. А., Лебедев В. Г., Беляев Д. С. Дымовые трубы энергетических установок. – М.: Энергия, 1976.
5. Дужих Ф. П. Осмоловский В. П., Лагидычев М. Г. Промышленные дымовые и вентилиционные трубы. – Теплотехник, М.: 2004.
6. Петров-Денисов В. Г., Конон П. Н. Процессы тепло- и массообмена в стволах дымовых труб в нестационарном режиме. Всесоюзная конф. «Современные проблемы разработки, проектирования, возведения и эксплуатации монолитных железобетонных труб». – М.:1983, с. 66–68.
7. Конон, П. Н. Моделирование нестационарных процессов тепло- и массообмена в многослойных дымовых трубах в условиях фазовых переходов / П. Н. Конон, М. А. Поддубная // Международный научно-технический сборник «Теоретическая и прикладная механика». – 2014. – Вып. 29. – С. 244–250.
8. Конон, П. Н. Исследования нестационарных процессов тепло- и массопереноса в двухслойных дымовых трубах / П. Н. Конон, Н. А. Докукова // Международный научно-технический сборник «Теоретическая и прикладная механика». – 2013. – Вып. 28. – С. 188–194.
9. Петров-Денисов, В. Г. К теории углубления фронта фазового перехода свободной влаги и образования избыточного давления при нагреве влажностных тел / В. Г. Петров-Денисов // Химическая промышленность. – 1979. – № 6.
10. Конон, П. Н. Исследования нестационарных процессов тепло- и массообмена в многослойных дымовых трубах / П. Н. Конон, Н. А. Докукова, М. А. Поддубная // Международная научная конференция «XI Белорусская математическая конференция». – 2012. – Ч. 3 – С. 70.
11. Заседателев, И. Б. Инструкция по теплоаэродинамическому расчету дымовых железобетонных труб с противодавлением в зазоре между стволом и футеровкой / И. Б. Заседателев, Ф. П. Дужих, Л. А. Славгородская. – Москва: Центральное бюро научно-технической информации, 1979. – 66 с.

Поступила: 21.03.2022