

УДК 536.24

## ПРОЦЕССЫ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В ВЫСОТНЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБАХ В ПЕРИОД ИХ ЗАПУСКА, УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ И ОСТАНОВКИ

*М.А. Грицкевич<sup>1</sup>, П.Н. Конон<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

e-mail: m.poddubnaya@psu.by

*Построена модель совместного тепло- и массопереноса с переменными теплофизическими характеристиками с учетом конденсации на внутренней поверхности трубы. Исследована задача определения нестационарных температурных полей в многослойной дымовой трубе в период пуска, устойчивой работы и остановки.*

*Ключевые слова: теплоперенос, массоперенос, нестационарные температурные поля, переменные теплофизические характеристики.*

## PROCESSES OF HEAT AND MASS TRANSFER IN HIGH-ALTITUDE CHIMNEYS DURING THEIR START-UP, STEADY OPERATION AND STOPPING

*M. Gritskevich<sup>1</sup>, P. Konon<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

e-mail: m.poddubnaya@psu.by

*A model of combined heat and mass transfer with variable thermophysical characteristics has been constructed, taking into account condensation on the inner surface of the pipe. The problem of determining non-stationary temperature fields in a multilayer chimney during the period of start-up, stable operation and shutdown has been studied.*

*Keywords: heat transfer, mass transfer, non-stationary temperature fields, variable thermophysical characteristics.*

**Введение.** Дымовые трубы тепловых электростанций (ТЭС), гидроэлектростанций (ГРЭС), котельных промышленных предприятий относятся к сложным специальным инженерным сооружениям башенного типа и являются неотъемлемой частью технологических схем промышленных предприятий, тепловых и гидроэлектростанций. Они предназначены для отвода газов от тепловых установок и рассеивание их в атмосфере. От надежности, прочности и долговечности этих сооружений зависит бесперебойная работа подключаемого к ним оборудования и агрегатов, обеспечение электроэнергией как отдельных промышленных предприятий, так и целых регионов.

Кроме того, Республика Беларусь находится в таком климатическом регионе, где различия в потреблении энергии в зимний и летний периоды существенны. Поэтому дальнейшее развитие энергетики связано с созданием надежных энергетических аппаратов, в том числе дымовых труб ТЭС и ГРЭС, в условиях частых пусков и остановок котельного оборудования.

В условиях пусков и остановок котельного оборудования при работе дымовых труб в отличие от используемого в настоящее время стационарного расчетного режима необходимо рассматривать нестационарные условия тепло- и массообмена, учитывающие перенос влаги в конструкциях в виде жидкости и пара и интенсивные фазовые превращения как на поверхности конструкций, так и поровой структуре материала футеровки и ствола [1–4]. Многократные циклы «нагрев-выдержка-охлаждение» оказывают наиболее существенное влияние на параметры напряженно-деформированного состояния конструкции. Поэтому расчет нестационарно-влажностных полей является актуальным.

**Постановка задачи.** Рассмотрим постановку задачи для двухслойной конструкции трубы [1; 2]. Особенности постановки задачи для многослойной конструкции будут отмечены ниже.

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, процессы тепло- и массообмена будем рассматривать в декартовой прямоугольной системе координат  $Oxy$ , что показано на рисунке 1. Аналитические расчеты конденсации серной кислоты показали, что потоки этого агрессивного компонента через поверхность футеровки составляют незначительную величину по сравнению с потоками конденсирующихся водяных паров, и их влияние на температурно-влажностный режим не учитывается. Так же считается, что при конденсации водяных паров на поверхности охлаждения жидкая фаза выпадает в виде сплошной пленки. Образующийся конденсат частично проникает в поры футеровки, основная же часть стекает по вертикальной, достаточно длинной стенке. Термическим сопротивлением пленки конденсата 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 [3].

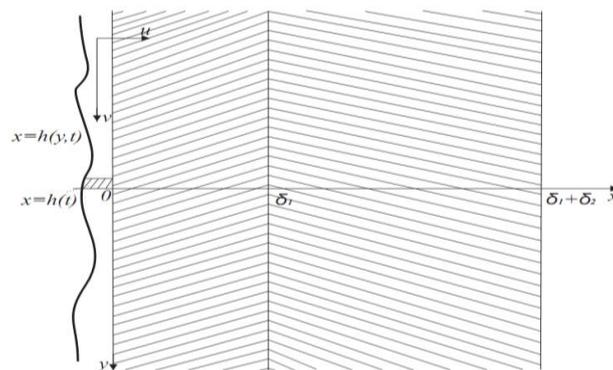


Рисунок 1. – К модели двухслойной конструкции трубы

Проведенные количественные оценки интенсивности тепло- и массообменных процессов в трубах в нестационарном режиме при подъеме температур дымовых газов по высоте трубы позволили заключить, что перепад температур и концентрации пара в потоке дымовых газов по высоте трубы незначительный; градиент температур в стволе трубы по высоте на два-три порядка ниже, чем по толщине конструкции и им можно пренебречь; поток влаги через внутреннюю поверхность футеровки обычно не превышает интенсивности конденсации на этой поверхности.

Температура и давление дымовых газов считаются известными функциями времени. В [2] проведена постановка задачи с учетом движения пленки конденсата и расчеты толщины пленки при конденсации водяных паров на внутренней поверхности футеровки. Ее толщина оказалась небольшой около 2-4 мм и в рассматриваемой модели ее не учитываем. Рассматривается диффузия жидкости через скелет тела, а также капиллярное впитывание. Определим удельное влагосодержание  $U$  как количество жидкости в единице объема скелета пористого тела. Массу воздуха и пара, которые присутствуют в капиллярах и порах пористого тела, считаем бесконечно малой по сравнению с массой жидкости.

Рассматривается диффузия жидкости через скелет тела, а также капиллярное впитывание. Фильтрационное движение не рассматривается, так как считается, что гидростатическое давление незначительно меняется по координате  $x$ .

Определим удельное влагосодержание  $U$  как количество жидкости в единице объема скелета пористого тела. Массу воздуха и пара, которые присутствуют в капиллярах и порах пористого тела, считаем бесконечно малой по сравнению с массой жидкости.

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.

Учитывая вышесказанные соображения и предположения, модель тепло- и массообмена в двухслойной трубе можно представить следующей системой уравнений в частных производных параболического типа с переменными коэффициентами:

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T, U) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (1)$$

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

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

На границе  $x=0$  задаются граничные условия третьего рода с учетом конденсации на свободной поверхности, учитывая, что температура дымовых газов линейно изменяется со временем.

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

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от газа к внутренней поверхности трубы. Для расчета среднего безразмерного коэффициента теплоотдачи при турбулентном вынужденном течении в [3; 7] использовано уравнение

$$Nu = 0.032 Re^{0.8} Pr^{0.3} \left( \frac{d}{h} \right)^{0.054}. \quad (4)$$

Расчеты по формуле (4) позволяют получить численное значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_1 = 20 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}$ , которое применяется в дальнейших расчетах.

Интенсивность конденсации  $g_k(t)$  определяется формулой:

$$g_k(t) = g_k(T(0, t)) = \beta \{P_n(t) - P_n[T(0, t)]\}. \quad (5)$$

Для определения давления насыщения на стенке при  $x=0$  использовалась эмпирическая формула:

$$P_n(T) = \begin{cases} 165914e^{\frac{7.331(T-374)}{T+273}}, & T > 100 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 760e^{\frac{13.963(T-100)}{T+273}}, & T < 100 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases}. \quad (6)$$

Если давление насыщения на стенке  $x=0$  сравняется 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 [2].

На поверхности соприкосновения двух слоев ставится условие равенства температур и потоков тепла:

$$\left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=\delta_1} = 0, \quad [T]_{x=\delta_1} = 0. \quad (7)$$

В (7) прямые скобки  $[\ ]$  означают скачок потока тепла и температуры на границе  $x = \delta_1$ . На границе  $x = \delta_1 + \delta_2$  задаются условия третьего рода:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1+\delta_2} = \alpha_2 [T(\delta_1 + \delta_2, t) - T_e]. \quad (8)$$

Граничные условия для определения влажностного поля определяются из следующих соображений. Считаем, что поле влаги распределяется в области футеровочного слоя толщиной  $\delta_1$ . Если поток влаги  $-a_m(U)\partial U / \partial x$  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.

$$\begin{cases} U(0, t) = U_m, & \text{при } -a_m(U) \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} \leq g_k(t) \\ -a_m(U) \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} = g_k(t), & \text{при } -a_m(U) \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x=0} > g_k(t) \end{cases}. \quad (9)$$

При  $x = \delta_1$  значение влагосодержания равно равновесному

$$U \Big|_{x=\delta_1} = U_p. \quad (10)$$

Кроме того, задаются начальные условия

$$T(x,0) = T_g, \quad U(x,0) = U_0. \quad (11)$$

При  $t > t_k$ , где  $t_k$  - время конденсации, процесс конденсации прекращается и начинается сушка увлажненной футеровки. Модель этого процесса описывается на основе теории углубления фронта фазового превращения свободной влаги.

Соотношения (1)–(11) определяют постановку задачи о совместном тепло- и массообмене в конструкции двухслойной трубы с учетом конденсации парогазовой смеси. При постановке задачи для многослойной конструкции необходимо учесть равенство потоков тепла и влаги на границе слоев.

**Результаты численных расчетов для многослойных труб.** В [2] приведены результаты численных расчетов температурных полей для двухслойных труб. Приведем результаты расчетов температурных полей многослойных труб как результат решения задачи (1)–(11) без учета конденсации. Разработан алгоритм численного расчета без учета сушки увлажненной футеровки. Для расчета выбрана балансовая консервативная неявная разностная схема, позволяющая использовать переменные коэффициенты в уравнениях диффузии тепла и влагосохранения [5]. При решении сеточных уравнений использовался метод прогонки. Все расчеты выполнены в системе Mathematica.

В качестве исходных данных использовались геометрические размеры четырехслойной дымовой трубы Ярославской ГРЭС высотой  $H=120$  м и диаметром  $D=9,6$  м. Четыре слоя – это футеровка, два слоя изоляции и железобетонный ствол. В качестве материала футеровки рассматривалась кладка из кислотоупорного кирпича. Первый слой теплоизоляции – это плиты теплоизоляционные полужесткие из минеральной ваты на синтетическом связующем; второй слой – это плиты перлитцементные на цементно-глиняном растворе. Несущий железобетонный ствол – бетон марки 300. Прижимная кладка отсутствует.

На границе всех слоев при постановке задачи использовалось условие равенства температур и потоков тепла. Коэффициент теплоотдачи можно определять по критериальным соотношениям и в расчетах предполагается равным  $\alpha = 20 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}$  на внутренней и наружной стенках. Рассчитывалось 6 сечений по высоте трубы. Проведем расчеты для сечения №3 трубы: отметка от низа основания сечения трубы – 90 м; толщина футеровки –  $\delta_1 = 0,23 \text{ м}$ ; толщина плит перлитных и теплоизоляционных  $\delta_2 = 0,075 \text{ м}$  и  $\delta_3 = 0,04 \text{ м}$  соответственно; толщина железобетонного ствола –  $\delta_4 = 0,20 \text{ м}$ . Теплофизические характеристики взяты для указанных выше материалов многослойной конструкции.

Рассматриваемый нестационарный режим работы соответствует многослойным трубам, подключенным к котлам ТП-90, ТП-230. При расчете он был задан следующим образом: подъем температуры дымовых газов  $T_z$  от  $T_g = -20 \text{ °C}$  до  $T_m = 160 \text{ °C}$  с постоянной скоростью  $k = V = 10 \text{ °C/ч}$ , выдержка до стационарного режима при  $T_z = T_m$ , охлаждение от  $T_z = T_m$  до  $T_g = -20 \text{ °C}$  линейно со скоростью  $k = V = 10 \text{ °C/ч}$ , дальнейшее охлаждение трубы при  $T_z = T_g$ .

На рисунках 2–4 приведены результаты численных расчетов в сечении №3 для многослойной трубы Ярославской ГРЭС, работающей в указанном выше пульсирующем тепловом режиме. Графики снабжены подробными подрисуночными комментариями. На рисунках 2–4 изображена зависимость температуры  $T(\text{°C})$  от поперечной координаты  $x(\text{м})$  многослойной трубы в периоды пуска, устойчивой работы и останова. Численный анализ температурных по-

лей четырехслойных труб при указанных режимах работы позволил заключить, что наличие теплоизоляции резко снижает температуру в железобетонном стволе. Максимальный перепад температуры в нем в течении всего рассматриваемого цикла составляет не более  $18^{\circ}\text{C}$ .

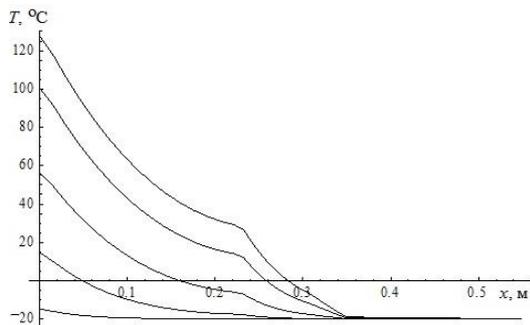


Рисунок 2. – Температурное поле многослойной трубы в различные моменты времени с начала подъема температуры дымовых газов

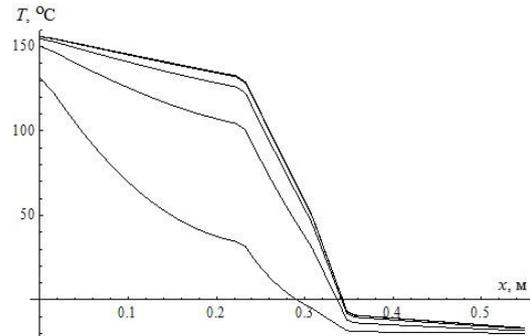


Рисунок 3. – Температурное поле многослойной трубы в различные моменты времени с начала выдержки температуры дымовых газов до стационарного режима

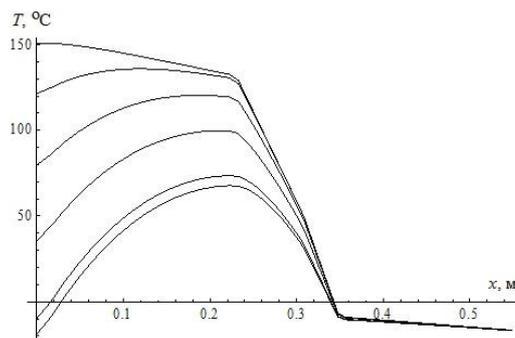


Рисунок 4. – Температурное поле многослойной трубы в различные моменты времени с начала охлаждения температуры дымовых газов

Наибольший перепад в футеровке наблюдается при росте температуры дымовых газов и при указанных выше данных равен  $96^{\circ}\text{C}$ , что существенно, хотя и на несколько часов, превышает допустимое значение в  $80^{\circ}\text{C}$ . При выходе на стационарный режим работы перепад составляет  $24^{\circ}\text{C}$ , а в период останова его максимальное значение равно  $81^{\circ}\text{C}$ . Можно сделать вывод, что только в период пуска или останова дымовой трубы могут возникнуть условия, нарушающие на некоторое время рекомендуемый режим эксплуатации. В целом же наличие многослойности оказывает положительное влияние на надежность труб в 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  $80^{\circ}\text{C}$ , согласно инструкциям института Теплопроект (г. Москва). При этом температура внутренней поверхности железобетонного ствола не должна превышать  $100^{\circ}\text{C}$ . 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  $5^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ , а в зимнее время должна быть выдержка в стационарном режиме в течение суток при температуре  $100^{\circ}\text{C}$ . Только проведя сушку трубы, приступают к ее эксплуатации.

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

Исследована задача определения нестационарных температурных полей в трубе многослойной конструкции в период пуска, устойчивой работы и остановки. Определены наиболее опасные зоны с большим градиентов температур и время возвращения дымовых газов на установившийся режим работы. Исследования проводились численным методом. Численные расчеты проведены методом конечных разностей с использованием консервативных разностных схем, выражающих законы сохранения, с последующим использованием метода прогонки.

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. 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». – 2013. – Вып. 29. – С. 244-250.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – Москва: Наука, 1977. – 740 с.
6. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – Москва: Атомиздат, 1979. – 659 с.
7. 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.