

УДК 697.85

DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-82-89

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЫМОВЫХ ТРУБАХ  
ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК\***

Д. А. Хворенков, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

О. И. Варфоломеева, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. Э. Пушкарев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Д. Н. Попов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Рассматривается методика и результаты расчета диффузионных процессов в дымовых трубах теплогенерирующих установок. Методика состоит из шести этапов, включающих моделирование газодинамических и теплообменных процессов на основе дифференциальных уравнений движения, неразрывности потока, сохранения энергии.*

*Дифференциальные уравнения движения записаны для турбулентного режима. Для расчета параметров теплообмена в стенке трубы использовалась интегральная форма уравнения диффузии. Течение с теплообменом моделировалось в программном комплексе Flow Vision. Для расчета диффузионных процессов в стенке трубы использовалась разработанная авторами компьютерная программа.*

*С целью апробации методики произведены расчеты диффузионных процессов в железобетонной сборной дымовой трубе высотой 30 м и диаметром 1,2 м при параметрах наиболее холодного месяца. В результате расчетов выяснено, что зоны возможной конденсации располагаются в наружных слоях стенки трубы или на ее наружной поверхности. Отмечено значительное влияние скорости течения дымовых газов в трубе на температурно-влажностный режим стенок.*

*Отличие методики от известных методик заключается в учете факторов, значительно влияющих на температурно-влажностный режим дымовых труб: размерных особенностей дымовых труб, нестационарности процессов, теплофизических и газодинамических характеристик удаляемых газов, состава природного газа. Методика на этапе проектирования дает возможность спрогнозировать диффузионные процессы в дымовых трубах теплогенерирующих установок, а также определить режимы эксплуатации действующих установок.*

**Ключевые слова:** дымовая труба, теплогенерация, диффузия, пар, серная кислота, конденсация, моделирование.

**Введение**

**П**овышение эффективности теплогенерирующих установок путем уменьшения потерь тепла с удаляемыми газами актуально и имеет огромное значение. С начала появления в XX веке теплогенерирующих установок значительной мощности внимание исследователей было привлечено к методам и способам утилизации теплоты; интерес к этой проблеме в настоящее время только вырос [1–3]. Тем не менее порог уменьшения тепловых потерь с удаляемыми газами необходимо устанавливать самостоятельно с учетом определенных частных условий. Граничной чертой допустимых характеристик удаляемых газов

после утилизатора теплоты служит температурно-влажностный режим в дымовых трубах. От этого режима зависит присутствие и скорость процессов, определяющих процессы разрушения и, следовательно, срок службы дымовых труб [4, 5].

Рост аварий на объектах энергетики в начале XXI века зачастую связан именно с несоблюдением заложенных в проекте характеристик температурно-влажностного режима. Не в последнюю очередь на это влияет отсутствие общепризнанных методик по определению параметров этого режима, в котором отражаются характерные размерные свойства дымовых труб, в том числе нарушения целостности, появ-

вившиеся при несоблюдении проектных требований в процессе строительства или эксплуатации, а также параметры массового переноса вещества в толще трубы и т. д.

Цель данной работы – создание методики расчета диффузионных процессов в дымовых трубах теплогенерирующих установок с учетом размерных особенностей труб, нестационарности процессов тепло-, массопереноса и апробация этой методики на примере железобетонной сборной дымовой трубы.

**Методика расчета диффузионного процесса в дымовых трубах**

Методика расчета диффузионных процессов в дымовых трубах теплогенерирующих установок включает в себя ряд этапов.

Этап 1. Для условий полного сгорания топлива подсчитывается состав и объем продуктов сгорания.

Этап 2. По вычисленным на этапе 1 данным с учетом реального избытка воздуха рассчитываются величины теплофизических и газодинамических характеристик продуктов сгорания в дымовых газах в пределах определенных температур дымовых газов в данной расчетной области.

Этап 3. Назначается температура газового потока на входе – начальной границе расчетного элемента.

Этап 4. Путем компьютерного моделирования теплообменных и газодинамических процессов находятся поля температуры, давления и скорости в расчетном элементе.

Одним из методов модельного расчета теплообменных и газодинамических потоков в дымовых трубах является нахождение решения сопряженной задачи [6]. При этом находятся характеристики потока удаляемых газов (рис. 1) и в толще дымовой трубы (рис. 2). В данном исследовании делается упор на дымовые трубы, так как именно они более подвергаются процессу образования конденсата.

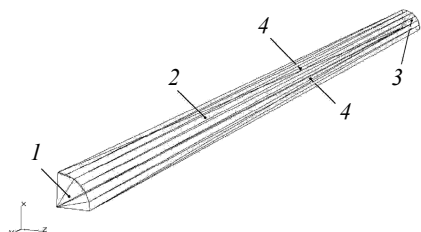


Рис. 1. Расчетный элемент потока продуктов сгорания: 1 – выход потока; 2 – внутренняя поверхность стенки; 3 – вход потока; 4 – плоскость симметрии

Fig. 1. The calculating area of combustion products flow: 1 - flow outlet; 2 - inner surface of the wall; 3 - flow inlet; 4 - plane of symmetry

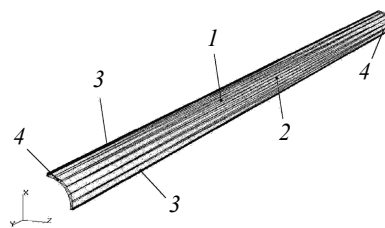


Рис. 2. Расчетный элемент дымовой трубы: 1 – внешняя поверхность трубы; 2 – внутренняя поверхность трубы; 3 – плоскость симметрии; 4 – торцевые грани трубы

Fig. 2. The calculating area of the chimney body: 1 - the outer surface of the body; 2 - the inner surface of the body; 3 - the plane of symmetry; 4 - end boundaries of the body

Моделирование потока с процессами теплообмена осуществлялось в программе Flow Vision. Используемый в составлении расчетной модели подход позволяет использовать ее и при расчете нестационарных процессов. Расчетная модель представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений. Используется трехмерная ортогональная система координат для первого и второго расчетного случая. Производится численное решение уравнений Навье – Стокса, сохранения энергии, турбулизированного массового обмена. Для стенки дымовой трубы уравнения сохранения энергии:

– область течения дымовых газов

$$\frac{\partial \rho v}{\partial \tau} + \nabla(\rho v \otimes v) = -\nabla p + \nabla \left\{ \left( \mu + \mu_t \right) \left[ \nabla v + (\nabla v)^T \right] \right\} + S,$$

где  $S = (\rho - \rho_{hyd}) g$ ;

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla(\rho v) = 0;$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial \tau} + \nabla(\rho v k) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \mu_t G - \rho \epsilon;$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial \tau} + \nabla(\rho v \epsilon) =$$

$$= \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\epsilon^2}{k};$$

– область стенки дымовой трубы

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \frac{\lambda}{C_p} \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho}.$$

Здесь  $v$  – вектор скорости;  $\rho$  – плотность среды;  $\rho_{hyd}$  – плотность среды на выходе из расчетной

области;  $\tau$  – время;  $p$  – давление;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $\mu_t$  – коэффициент турбулентной динамической вязкости;  $S$  – источник член уравнения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $Q$  – тепловой поток;  $h$  – энтальпия потока;  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $\varepsilon$  – диссипация кинетической энергии турбулентности;  $Pr_t$  – турбулентное число Прандтля;  $G$  – генерация кинетической энергии турбулентности;  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  – числа Прандтля в уравнениях модели;  $C_1 = 1,44$ ,  $C_2 = 1,92$ ,  $C_\mu = 0,09$  – эмпирические константы модели турбулентности;  $f_1$  – функция низкорейнольдсовых моделей. Для примененной стандартной  $k-\varepsilon$  модели  $f_1 = 1$ .

В табл. 1 представлены граничные условия на поверхностях расчетных областей.

Таблица 1. Граничные условия по скорости и температуре для сопряженной задачи

Table 1. Speed and thermal boundary conditions for the conjugate problem

Название границы	Граничные условия
Расчетная область течения дымовых газов	
Вход потока	температура $t = t_{вх}$ ; скорость $v = v_{вх}$
Выход потока	$\frac{dv}{dz} = 0$ ; $\frac{dt}{dz} = 0$ ;
Внутренняя поверхность стенки дымовой трубы	$V = 0$ м/с; $\alpha_{вн} (t_{вн.ст} - t_{ж}) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}$ ;
Плоскость симметрии	$\frac{dv}{dn} = 0$ ; $\frac{dt}{dn} = 0$
Расчетная область стенки дымовой трубы	
Внутренняя поверхность стенки дымовой трубы	$\alpha_{вн} (t_{вн.ст} - t_{ж}) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}$
Внешняя поверхность стенки дымовой трубы	$\alpha_{н} (t_{нар.ст} - t_{возд}) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}$
Плоскость симметрии	$\frac{dt}{dn} = 0$
Торцевая граница стенки дымовой трубы	$\frac{dt}{dn} = 0$

Здесь  $\alpha_{вн}$ ,  $\alpha_{н}$  – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стенки трубы соответственно.

Второй способ решения задачи заключается в моделировании процессов тепло- и массообмена в области потока удаляемых газов. При этом температура внутренней поверхности стенки определяется с помощью уравнений теплопередачи в одномерной постановке, расчет параметров в толще стенки не производится. Этот способ значительно облегчает решение и возможен в том случае, когда не нужны значения температур в толще дымовой трубы, что актуально для тонких металлических дымовых труб.

Здесь теплообмен с наружной стороны дымовой трубы определяется с учетом изменения коэффициента теплоотдачи по высоте дымовой трубы, что характерно для высоких труб.

Теплообмен между дымовыми газами и стенкой трубы описывается критериальным уравнением вида

$$Nu = \frac{\xi Re Pr}{1 + \frac{900}{Re} + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr^{2/3} - 1)},$$

$$\xi = (1,82 \lg Re - 1,64)^{-2}.$$

Этап 5. Находятся границы зон конденсации водяных паров воды или паров серной кислоты с использованием найденных на этапе 5 значений температуры и давлений.

Топлива, содержащие серу, лимитируют решение задачи по температуре насыщения паров серной кислоты. Их содержание в удаляемом газе находится по уравнениям термодинамического равновесия химических реакций с учетом констант равновесия [7, 8]. Данные по насыщению паров серной кислоты различных видов топлива в зависимости от серосодержания находятся в работе [9].

Температура точки росы паров серной кислоты, полученная Р. А. Петросяном, является более точной, чем температура, полученная с помощью констант равновесия реакций. Это связано с учетом в методике Р. А. Петросяна опыта эксплуатации теплогенерирующих установок, на которых используются сернистые топлива, в том числе с учетом катализаторов.

Сравнение теоретических расчетов по вышеуказанным методикам с данными, полученными на практике, приводится в работах [10, 11]. Результаты подтверждают жизненность методики Р. А. Петросяна.

Этап 6. К нему прибегают тогда, когда толщина дымовой трубы проницаема для паров. Нахо-

дится зона конденсации паров, проходящих наружу сквозь толщу стенки дымовой трубы.

Эта зона находится путем численного расчета, аналогичного графоаналитическому методу [12]. Парциальное давление пара в толще дымовой трубы находится по ряду температур, определенных численно на этапе 4 предлагаемой методики, или с помощью уравнения стационарной одномерной теплопередачи в цилиндрической постановке. По температурам рассчитывается максимальное парциальное давление водяного пара  $E$ . В таблице 2 приведена аппроксимация известных формул парциальных давлений, которая использовалась в данной методике.

Таблица 2. Зависимость парциального давления водяного пара от температуры

Table 2. Function of water saturation pressure on temperature

Диапазон температур, °С	Вид зависимости	Коэффициент детерминации $R^2$
-30...-20	$E = 797,43 \exp(0,1018 t)$	0,9956
-20...0	$E = 623,63 \exp(0,0887 t)$	0,9998
0...100	$E = 0,0009t^4 - 0,0152t^3 + 2,401t^2 + 39,263t + 610,8$	0,9998
100...200	$E = 0,0015t^4 - 0,1885t^3 + 19,832t^2 - 677,26t + 9486,2$	1,0000

На средней по высоте трубы температуре удаляемых газов  $t_b$  находится парциальное давление водяного пара  $E_b$ , по температуре окружающего воздуха  $t_n$  – парциальное давление водяного пара наружного воздуха  $E_n$ . С учетом влажности наружного воздуха рассчитывается парциальное давление водяного пара. Парциальное давление водяного пара продуктов сгорания  $e_b$  рассчитывается по содержанию водяных паров и статическому давлению удаляемых газов в дымовой трубе на требуемой высоте. При этом сопротивление паропроницанию цилиндрической стенки дымовой трубы,  $\text{Па} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^2 / \text{мг}$ :

$$R_{\text{н.орг}} = R_{\text{н.в}} + \sum_{i=1}^n R_{\text{ш}} + R_{\text{н.н}}$$

Сопротивление паропроницанию обратно пропорционально коэффициенту влагообмена  $\beta_n$ ; для плоской стенки,  $\text{Па} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^2 / \text{мг}$ :

$$R_n = \frac{1}{\beta_n}$$

Сопротивление влагообмену для плоской стенки,  $\text{Па} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^2 / \text{мг}$ :

$$R_{\text{н.в(н)}} = \left(1 - \frac{\Phi}{100}\right) / 0,1333$$

По известному сопротивлению влагообмена для плоской стенки  $R_n$ ,  $\text{Па} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^2 / \text{мг}$ , из двух последних формул находится коэффициент влагообмена  $\beta$ ,  $\text{мг} / (\text{Па} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^2)$ , после чего определяется сопротивление влагообмена цилиндрической стенки,  $\text{Па} \cdot \text{ч} \cdot \text{м} / \text{мг}$ :

$$R_n = \frac{2}{\beta d_{\text{в(н)}}}$$

Сопротивление паропроницанию  $i$ -го слоя стенки,  $\text{Па} \cdot \text{ч} \cdot \text{м} / \text{мг}$ :

$$R_{\text{ш}} = \frac{1}{\mu_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}$$

Плотность потока пара на 1 м длины трубы,  $\text{мг} / (\text{ч} \cdot \text{м})$ :

$$g_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{e_b - e_n}{R_{\text{н.орг}}}$$

Упругость водяного пара на наружной  $e_{\text{лсн}}$  и внутренней  $e_{\text{лсв}}$  поверхностях стенки, Па:

$$e_{\text{лсн(в)}} = e_{\text{н(в)}} \pm g_{\text{H}_2\text{O}} R_{\text{н.н(в)}}$$

Зона возможного выпадения конденсата находится по методике, приведенной в работе [13]. Численный расчет повторяется по всей высоте трубы с помощью разработанной программы. Эта же методика подходит и к расчету конденсации паров серной кислоты.

Используя разработанную и реализованную в компьютерной программе методику, можно рассчитать диффузионные процессы в толще железобетонной дымовой трубы с внутренним диаметром 1,2 м, высотой 30 м, построенной по типовому проекту 907-2-229 «Труба дымовая сборная железобетонная». На высоте 4,4 м имеется газоход, толщина стенки трубы до высоты 8 м – 250 мм, выше – 100 мм (рис. 3). Труба железобетонная, однослойная, без теплоизоляции, коэффициент теплопроводности 2,04 Вт/(м·К), коэффициент паропроницаемости 0,03 мг/(м·ч·Па).

Приняты средние параметры наружного воздуха для наиболее холодного месяца:  $t_n = -13,4$  °С, относительная влажность  $\phi_n = 83$  %, давление  $p = 99\,700$  Па.

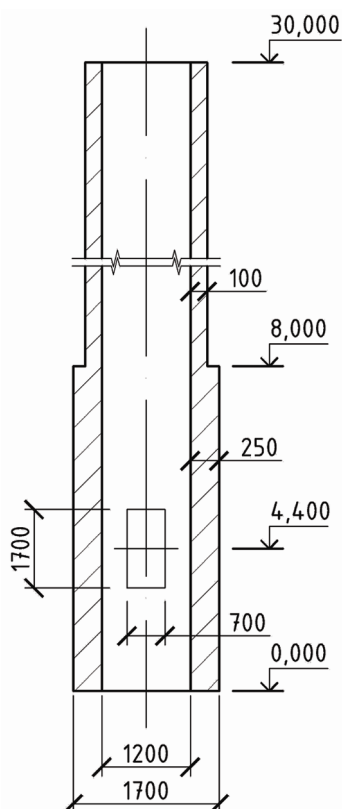


Рис. 3. Железобетонная дымовая труба:  
 $H = 30$  м,  $d_0 = 1,2$  м

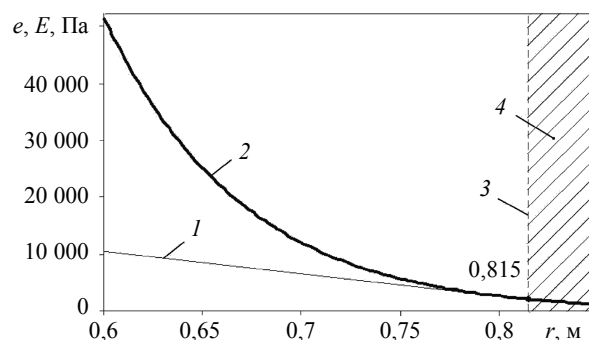
Fig. 3. A reinforced concrete chimney:  
 $H = 30$  м,  $d_0 = 1.2$  м

Состав удаляемых газов соответствует продуктам полного сгорания природного газа с содержанием  $\text{CH}_4 = 95,81$  %;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 2,35$  %;  $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,75$  %;  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,25$  %;  $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,07$  %;  $\text{CO}_2 = 0,16$  %;  $\text{N}_2 = 0,60$  %;  $\text{O}_2 = 0,01$  %. При заданном коэффициенте избытка воздуха в дымовых газах объемная доля водяных паров  $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,192$ . Расчет производился с высоты присоединения газохода до устья дымовой трубы (высота 30 м). На входе в дымовую трубу скорость продуктов сгорания 15 м/с, температура 110 °С.

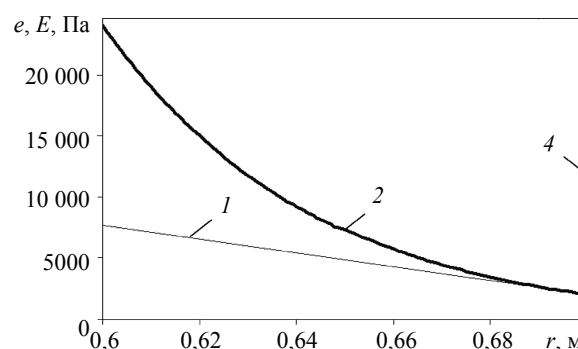
Скорость снижения температуры газов до высоты 8 м составил 0,15 °С/м, выше 8 м – 0,22 °С/м. С уменьшением температуры снижается парциальное давление водяных паров, что приводит к увеличению относительной влажности удаляемых газов с 13,3 до 16,0 %.

С помощью расчетов выявлено образование конденсата в толще трубы с высоты присоединения газоходов до высоты 8 м, где изменяется толщина стенки трубы, а также с отметки 24,8 м до верхней отметки трубы. На рис. 4 показаны линии парциального давления и максимального

парциального давления водяных паров удаляемых газов по толщине стенки на высоте 6,1 и 27,4 м.



а



б

Рис. 4. Парциальное давление водяных паров  $r$  в стенке дымовой трубы: а – на высоте 6,1 м; б – на высоте 27,4 м; 1 – линия парциального давления водяного пара; 2 – линия максимального парциального давления водяного пара; 3 – граница зоны образования конденсата; 4 – зона образования конденсата

Fig. 4. The partial pressure of water vapor on radius  $r$  in the wall of the chimney: а - at a height of 6.1 m; б - at a height of 27.4 m; 1 - line of water vapor partial pressure; 2 - line of water saturation pressure; 3 - boundary of condensation zone; 4 - condensation zone

Зона конденсации водяных паров в нижней части трубы располагается в наружных слоях стенки, начиная с радиуса  $r = 0,815$  м до наружной поверхности трубы. В верхней части трубы (высота 27,4 м) образование конденсата происходит только на ее наружной поверхности. При толщине стенки 0,1 м поток пара  $g_{\text{H}_2\text{O}} = 6815$  мг/(ч·м). При толщине стенки 0,25 м поток пара составляет  $g_{\text{H}_2\text{O}} = 4982$  мг/(ч·м).

В заданных условиях конденсация водяных паров на внутренней поверхности трубы отсутствует, однако это не гарантирует нормального влажностного режима – в нижней и верхней частях трубы наружные слои увлажнены. Инспектирование железобетонных и кирпичных

дымовых труб, отводящих продукты сгорания природного газа, подтверждает результаты расчетов.

Для железобетонной дымовой трубы с приведенными выше характеристиками найдена минимальная температура дымовых газов на входе, при которой в стенке трубы не происходит конденсация водяных паров. Изменялась величина скорости  $v$  удаляемых газов для природного газа (доля водяных паров в продуктах сгорания при коэффициенте избытка воздуха 1,05  $r_{H_2O} = 0,192$ ) и каменного угля (доля водяных паров в продуктах сгорания при коэффициенте избытка воздуха 1,2  $r_{H_2O} = 0,094$ ). На рис. 5 приведены зависимости минимальной температуры продуктов сгорания природного газа и каменного угля для различных скоростей удаляемых газов.

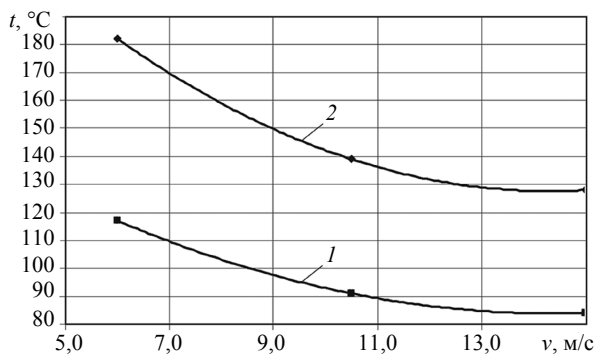


Рис. 5. Минимальная температура удаляемых газов на входе в дымовую трубу при различной скорости на входе и сжигаемом топливе: 1 – природный газ; 2 – каменный уголь

Fig. 5. The minimum temperature of the flue gases at the entrance to the chimney at different inlet rates and the fuel burned: 1 - natural gas; 2 - coal

Результаты указывают на значительное влияние скорости течения удаляемых газов на температурно-влажностный режим стенок трубы. На малых скоростях, что характерно при сниженной тепловой нагрузке, возможна конденсация водяных паров в стенке трубы. Химический состав топлива также серьезно влияет на температурно-влажностный режим.

На рис. 6 приведена зависимость изменения плотности потока водяного пара через стенку дымовой трубы при различных температурах продуктов сгорания природного газа и каменного угля на входе в трубу. Уменьшение температуры газов приводит к увеличению плотности потока.

Снижение диффузии воды в стенку трубы при увеличении температуры газов на входе

связано с тем, что уменьшается их относительная влажность, сопротивление влагообмену увеличивается.

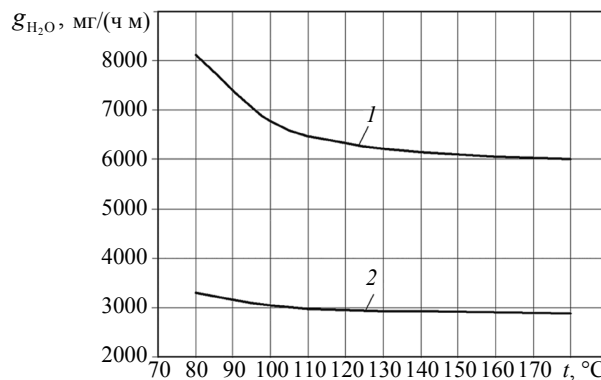


Рис. 6. Зависимость плотности потока водяного пара  $g_{H_2O}$  через стенку железобетонной дымовой трубы от температуры продуктов сгорания на входе в трубу при сжигании: 1 – природного газа; 2 – каменного угля

Fig. 6. The function of the water vapor flux density  $g_{H_2O}$  through the reinforced concrete chimney wall on the combustion products inlet temperature at the chimney during combustion of: 1 - natural gas; 2 - coal

**Выводы**

Таким образом, на основе дифференциальных уравнений Навье – Стокса, уравнения сохранения энергии, уравнений турбулизованного переноса, уравнений диффузии водяного пара разработана численная методика расчета диффузионных процессов в дымовых трубах. Методика на этапе проектирования дает возможность спрогнозировать диффузионные процессы в дымовых трубах теплогенерирующих установок, а также определить режимы эксплуатации действующих установок.

Отличие методики от известных методик заключается в учете факторов, значительно влияющих на температурно-влажностный режим дымовых труб, в первую очередь размерных особенностей дымовых труб, нестационарность процессов, теплофизические и газодинамические характеристики удаляемых газов, состав природного газа.

Расчеты, произведенные для разных режимов эксплуатации железобетонной дымовой трубы, выявили зоны конденсации в наружных слоях стенок дымовой трубы во всем диапазоне режимов работы теплогенерирующей установки. В железобетонных и кирпичных дымовых трубах область конденсации может обнаружиться в толще дымовой трубы на любой высоте, что может привести с течением времени к разрушению трубы.

## Библиографические ссылки

1. Chi-Ming Chu, Md Mizanur Rahman, Sivakumar Kumaresan. [Improved thermal energy discharge rate from a temperature-controlled heating source in a natural draft chimney]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 98, pp. 991-1002.
2. Liang Xu, Jingqi Yuan. [Thermodynamic properties calculation of the flue gas based on its composition estimation for coal-fired power plants]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 90, pp. 366-375.
3. Yeon-Gun L., Yeong-Jun J., Dong-Jae C., Sin K. [Experimental Investigation of Steam Condensation Heat Transfer in the Presence of Noncondensable Gas on a Vertical Tube]. *Journal of Energy Engineering*, 2015, vol. 24, no. 1, pp. 42-50.
4. Варнашов В. В., Киселев А. А., Гребнов В. С. Расчетные исследования режимов работы кирпичных дымовых труб в условиях эксплуатации // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 1. С. 18–26. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.018-026.
5. Pan P., Chen H., Liang Z., Zhao Q. [Experimental study on corrosion of steels for flue gas reheaters in a coal-fired power plant]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 115, pp. 267-279.
6. Попов Д. Н., Варфоломеева О. И., Хворенков Д. А. Численное исследование неизоотермических течений нефтепродуктов с учетом нестабильных вязкопластических свойств : монография. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2013. 64 с. ISBN 978-5-7526-0622-9.
7. Боресков Г. К. Катализ в производстве серной кислоты. М. : Госхимиздат, 1954. 350 с.
8. Дужих Ф. П., Осоловский В. П., Ладыгичев М. Г. Промышленные и вентиляционные трубы / под ред. Ф. П. Дужих. М. : Теплотехник, 2004. 464 с.
9. Петросян Р. А. Некоторые результаты определения точек росы продуктов сгорания различных топлив // Теплоэнергетика. 1958. № 2. С. 64–67.
10. Внуков А. К. Теплохимические процессы в газовом тракте паровых котлов. М. : Энергоиздат, 1981. 296 с.
11. Шицман С. Е. Точка росы дымовых газов // Теплоэнергетика. 1954. № 6. С. 58–60.
12. Хворенков Д. А., Варфоломеева О. И., Корпанов Е. В. Расчет температурно-влажностного режима стенок кирпичных и железобетонных дымовых труб // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 9-10. С. 94–105.
13. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М. : АВОК-Пресс, 2006. 256 с.

## References

1. Chi-Ming Chu, Md Mizanur Rahman, Sivakumar Kumaresan. [Improved thermal energy discharge rate from a temperature-controlled heating source in a natural draft chimney]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 98, pp. 991-1002.
2. Liang Xu, Jingqi Yuan. [Thermodynamic properties calculation of the flue gas based on its composition estimation for coal-fired power plants]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 90, pp. 366-375.
3. Yeon-Gun L., Yeong-Jun J., Dong-Jae C., Sin K. [Experimental Investigation of Steam Condensation Heat Transfer in the Presence of Noncondensable Gas on a Vertical Tube]. *Journal of Energy Engineering*, 2015, vol. 24, no. 1, pp. 42-50.
4. Varnashov V.V., Kiselev A.A., Grebnov V.S. [A study of operation modes of brick chimneys in operation]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universita*, 2016, no. 1, pp. 18-26. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.018-026 (in Russ.).
5. Pan P., Chen H., Liang Z., Zhao Q. [Experimental study on corrosion of steels for flue gas reheaters in a coal-fired power plant]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 115, pp. 267-279.
6. Popov D.N., Varfolomeeva O.I., Khvorenkov D.A. *Chislennoe issledovanie neizotermicheskikh techenii nefteproduktov s uchetom nestabil'nykh vyazkoplasticheskikh svoistv* [A numerical study of non-isothermal flows of petroleum products, taking into account unstable viscoplastic properties]. Izhevsk, ISTU Publ., 2013, 64 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7526-0622-9.
7. Boreskov G.K. *Kataliz v proizvodstve sernoi kisloty* [Catalysis in the production of sulfuric acid]. Moscow, Goskimizdat Publ., 1954, 350 p. (in Russ.).
8. Duzhikh F.P., Osolovsky V.P., Ladygichev M.G. *Promyshlennyye i ventilyatsionnyye trubyy* [Industrial and ventilation chimneys]. Moscow, Teplotekhnik Publ., 2004, 464 p. (in Russ.).
9. Petrosyan R.A. [Some results of the dew points determining of various fuels combustion products]. *Teploenergetika*, 1958, no. 2, pp. 64-67 (in Russ.).
10. Vnukov A.K. *Teplokhimicheskie protsessy v gazovom trakte parovykh kotlov* [Thermochemical processes in the gas path of steam boilers]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 296 p. (in Russ.).
11. Shitsman S.E. (1954) [Flue gas dew point]. *Teploenergetika*, 1954, no. 6, pp. 58-60 (in Russ.).
12. Khvorenkov D.A., Varfolomeeva O.I., Korpanov E.V. [Calculation of temperature-humidity mode of brick and reinforced concrete chimneys walls]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2017, vol. 19, no. 9-10, pp. 94-105 (in Russ.).
13. Fokin K.F. *Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastei zdaniy* [Building heat engineering of enclosing parts of buildings]. Moscow, ABOK-Press Publ., 2006, 256 p. (in Russ.).

**Analytical and Numerical Modeling of Diffusion Processes in Smoke Pipes of Heat Generating Plants**

*D.A. Khvorenkov*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia  
*O.I. Varfolomeeva*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia  
*A.E. Pushkarev*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia  
*D.N. Popov*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*Method and results of calculation of diffusion processes in smoke pipes of heat generating plants are considered. The technique consists of six stages, including modeling of gas-dynamic and heat-mass-exchange processes based on differential equations of motion, continuity of flow, preservation of energy.*

*Differential motion equations are written for the turbulent mode. An integral form of the diffusion equation was used to calculate the moisture exchange parameters in the pipe wall. The flow with heat exchange was simulated in Flow Vision software complex. A computer program developed by the authors was used to calculate diffusion processes in the pipe wall.*

*In order to test the method, the diffusion processes were calculated in a reinforced concrete stack assembly with a height of 30 m and a diameter of 1.2 m at the parameters of the coldest month. As a result of the calculations, it has been found that the zones of possible condensation are located in the outer layers of the pipe wall or on its outer surface. The significant effect of the flow rate of flue gases in the pipe on the temperature and humidity conditions of the walls is noted.*

*The difference of this technique from the known methods consists in taking into account the factors that significantly influence the temperature and humidity mode of the chimney, primarily the dimensional features of the chimney, the transient processes, the thermophysical and gas-dynamic characteristics of the gases to be removed, and the composition of natural gas. The technique, at the design stage, makes it possible to predict diffusion processes in smoke pipes of heat generating plants, as well as to determine operating modes of operating plants.*

**Keywords:** smoke pipe, heat generation, diffusion, steam, sulfuric acid, condensation, modeling.

Получено 19.08.2019

**Образец цитирования**

Аналитическое и численное моделирование диффузионных процессов в дымовых трубах теплогенерирующих установок / Д. А. Хворенков, О. И. Варфоломеева, А. Э. Пушкарев, Д. Н. Попов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 3. С. 82–89. DOI:10.22213/2413-1172-2019-3-82-89 .

**For Citation**

Khvorenkov D.A., Varfolomeeva O.I., Pushkarev A.E., Popov D.N. [Analytical and numerical modeling of diffusion processes in smoke pipes of heat generating plants]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 82-89 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-82-89.