

Методика расчета температурно-влажностных режимов работы дымовых труб теплоэнергетических установок

Хворенков Д. А., инж., Варфоломеева О. И., канд. техн. наук
**ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет
 имени М. Т. Калашникова»**

Описана методика расчета температурно-влажностных режимов работы дымовых труб теплогенерирующих объектов на основе численного моделирования. Приведены алгоритм методики расчета, математическая модель и результаты верификации.

Ключевые слова: дымовая труба, котельная установка, конденсатообразование, математическая модель, численное моделирование, низкотемпературная коррозия.

Дымовые трубы котельных установок — сложные, дорогостоящие и опасные производственные объекты, от надежности и долговечности которых зависит бесперебойная работа теплогенерирующего оборудования в целом. Соблюдение проектных температурно-влажностных режимов работы, обеспечивающих отсутствие конденсатообразования, с одной стороны, и минимальные потери сходящими газами, с другой, является сложной технической задачей.

Существующие методики расчета не учитывают влияние многих факторов, от которых зависит работа дымовых труб систем дымоудаления. В данной статье предложена методика расчета их температурно-влажностного режима. Математическая модель, на основе которой она разрабатывается, должна учитывать нестационарность процессов, переменный характер теплофизических и газодинамических параметров продуктов сгорания, нелинейность решаемой задачи.

Алгоритм методики расчета температурно-влажностного режима дымовой трубы приведен на рис. 1. В блоке 1 алгоритма выполняется расчет объемов продуктов сгорания, отводимых в атмосферу через дымовую трубу, по формулам для расчета состава продуктов полного сгорания топлива. В блоке 2 реализуется процедура получения математических зависимостей газодинамических и теплофизических свойств дымовых газов путем аппроксимации их дискретных значений, вычисленных в разработанной авторами программе GasMix.

Поскольку алгоритм решения поставленной задачи является нелинейным, в следующем элементе расчетного алгоритма (блок 3) задается температура продуктов сгорания на входе в дымовую трубу в качестве начального приближения к температуре насыщения либо водяных паров, либо серной кислоты. Эту

температуру следует выбирать выше температуры точки росы дымовых газов, образующихся при сжигании топлива заданного состава. При этом необходимо учитывать наличие серосодержащих компонентов в исходном топливе.

Один из подходов к решению задач такого класса — вариант сопряженной задачи теплообмена. Рассматриваются две расчетные области — область течения дымовых газов и область стенки дымовой трубы, сопрягаемые по общей границе. Расчетные области представляют собой секторы с углом раскрытия 90°.

Математическая модель течения продуктов сгорания с теплообменом в дымовой трубе (блок 4) включает в себя систему нестационарных дифференциальных уравнений в трехмерной постановке — в декартовой системе координат.

Область течения дымовых газов:

уравнение количества движения

$$\partial \rho V / \partial \tau + \nabla (\rho V \otimes V) = -\nabla P + \nabla \{ (\mu + \mu_t) [\nabla V + (\nabla V)^T] \} + S; \quad (1)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla (\rho V) = 0; \quad (2)$$

уравнение энергии

$$\partial (\rho h) / \partial \tau + \nabla (\rho V h) = \nabla \left[\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right] + Q; \quad (3)$$

уравнения для k и ε :

$$\partial (\rho k) / \partial \tau + \nabla (\rho V k) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \mu_t G - \rho \varepsilon; \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial \tau} + \nabla (\rho V \varepsilon) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (5)$$

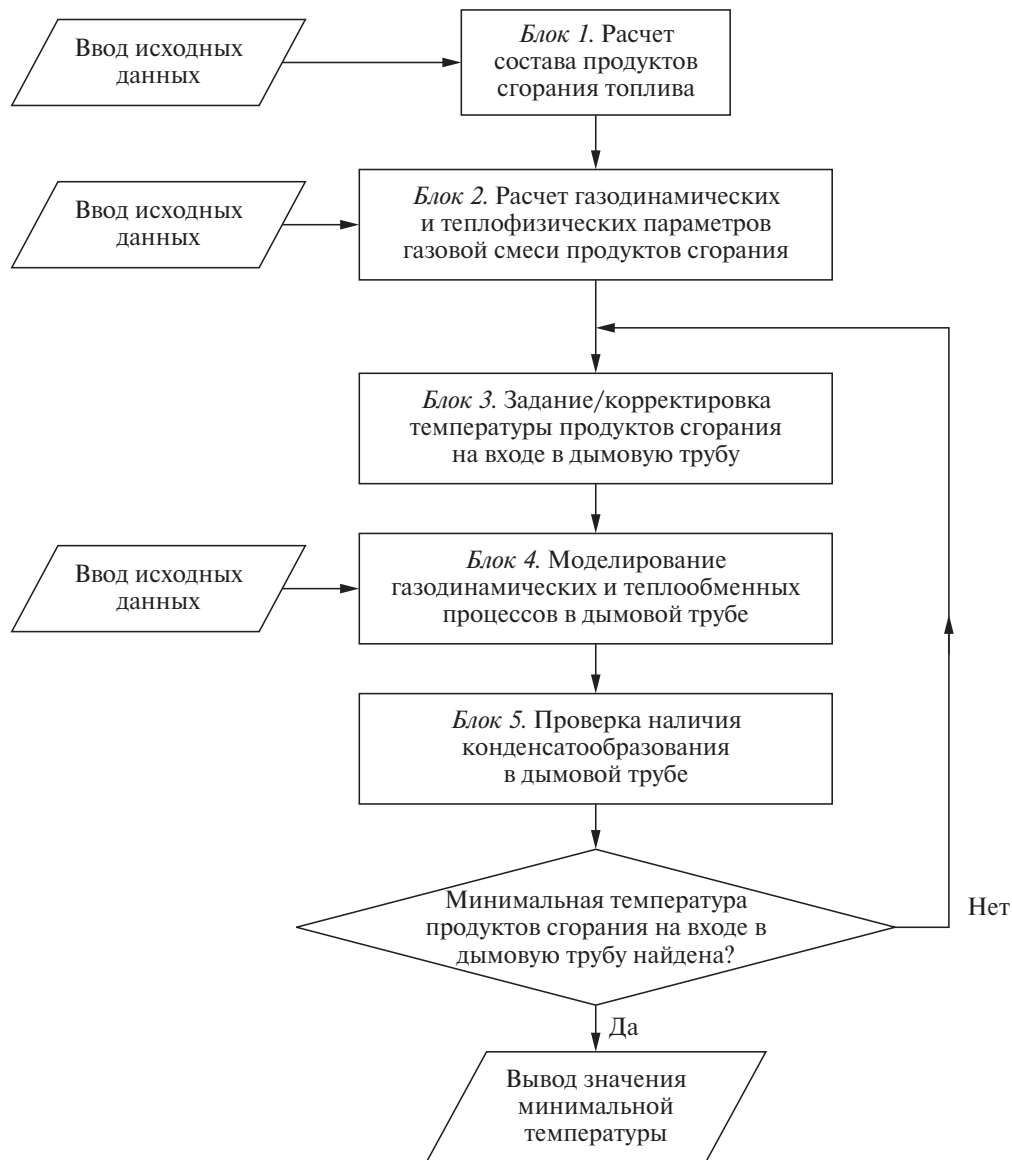


Рис. 1. Алгоритм расчета температурно-влажностного режима дымовой трубы

Область стенки дымовой трубы:
уравнение энергии

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho}. \quad (6)$$

В уравнениях использованы следующие обозначения: $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ — турбулентная динамическая вязкость; V — вектор скорости; ρ — плотность среды; ρ_{hyd} — плотность среды на выходе из расчетной области; τ — время; P — давление; μ — динамическая вязкость; $S = (\rho - \rho_{hyd})g$ — источниковый член уравнения; g — ускорение свободного падения; h — энтальпия потока; c_p — удельная изобарная теплоемкость; Q — энергия внутреннего тепловыделения или теплопоглощения; λ — теплопроводность; k — кинетиче-

ская энергия турбулентности; ε — диссипация кинетической энергии турбулентности; 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 $f_1 = 1$).

Начальные условия: $V = 0$ м/с; $t = t_n$. Граничные условия для сопряженной задачи приведены в таблице.

При расчете теплообмена на наружной поверхности дымовой трубы α_n рекомендуется учитывать изменение коэффициента теплоотдачи по высоте [1], поскольку эта величина при обтекании сооружений башенного типа изменяется существенно. Рекомендуемые зна-

Название границы	Граничные условия
Расчетная область течения дымовых газов	
Вход потока	Температура $t = t_{\text{вх}}$ Скорость $V = V_{\text{вх}}$
Выход потока	$dV/dz = 0, \quad dt/dz = 0$
Внутренняя поверхность стенки дымовой трубы	$V = 0 \text{ м/с}; \quad t_{w \text{ газ}} = t_{w \text{ ст}}; \quad -\lambda_{\text{газ}} \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right _{w \text{ газ}} = -\lambda_{\text{ст}} \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right _{w \text{ ст}}$
Плоскость симметрии	$dV/dn = 0, \quad dt/dn = 0$
Расчетная область стенки дымовой трубы	
Внутренняя поверхность стенки дымовой трубы	$t_{w \text{ газ}} = t_{w \text{ ст}}; \quad -\lambda_{\text{газ}} \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right _{w \text{ газ}} = -\lambda_{\text{ст}} \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right _{w \text{ ст}}$
Внешняя поверхность стенки дымовой трубы	$\alpha_{\text{н}}(t_{\text{нар.ст}} - t_{\text{возд}}) = -\lambda_{\text{ст}} \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right _{w \text{ ст}}$
Плоскость симметрии	$dt/dn = 0$
Торцевая граница стенки дымовой трубы	$dt/dn = 0$

Примечание. Индексом “вх” обозначены переменные, значения которых принимаются с входной границы расчетной области, индексом “w” — значения переменных на стенке со стороны области течения продуктов сгорания (индекс “газ”) или со стороны внутренней ограждающей конструкции дымовой трубы (индекс “ст”); индекс “нар.ст” относится к значению на наружной поверхности дымовой трубы, индекс “возд” — к значению параметра наружного воздуха.

чения коэффициента теплоотдачи, Вт/(м² · °С), для различных высотных отметок, заданные таблично кусочно-гладкой функцией, были аппроксимированы авторами статьи квадратичной функцией

$$\alpha_{\text{н}} = -0,0007z^2 + 0,3327z + 20,02.$$

Численная реализация математической модели течения продуктов сгорания с теплообменом выполнена с помощью программного комплекса FlowVision.

Фазовое состояние водяных паров, входящих в состав дымовых газов, определяется по рассчитанным полям давления и температуры в расчетной области дымовой трубы. Наличие конденсатообразования на внутренней стенке дымовой трубы выявляется (блок 5) с помощью программы Dew Point Determination, разработанной авторами. Если на внутренней поверхности стенки дымовой трубы конденсации не происходит, то температуру на входе в дымовую трубу уменьшают, в противном случае ее увеличивают, переходя к блоку 3.

Для оценки точности результатов численного моделирования с помощью разработанной математической модели проведен ряд

численных экспериментов для течения воздуха в цилиндрической трубе. Эпюры скорости и профили температуры в поперечном сечении установившегося потока приведены на рис. 2 для следующих типов граничных условий на стенке трубы:

1) стенка с абсолютной шероховатостью $h_s = 500 \text{ мкм}$ (кривая 1);

2) для гидравлически гладкой трубы (кривая 2).

Кривая 3 на рис. 2, а является распределением безразмерной скорости в трубе по данным [2] при $Re = 43\,234$ и $n = 6,41$. Для верификации полученного профиля безразмерной температуры использовались экспериментальные данные [3]. На рис. 2, б кривая 3 является распределением безразмерной температуры в поперечном сечении трубы при $t = 100 \text{ °С}$, $Pr = 0,688$.

Для оценки погрешностей численного эксперимента с кривыми 3 на рис. 2 сравнивали результаты численного эксперимента с граничными условиями на стенке, соответствующими гидравлически гладкой трубе.

Результат расчета погрешности безразмерной скорости не превышает 12,4 %, безразмерной температуры — 18,2 %. Среднее интегральное значение погрешности безразмерной

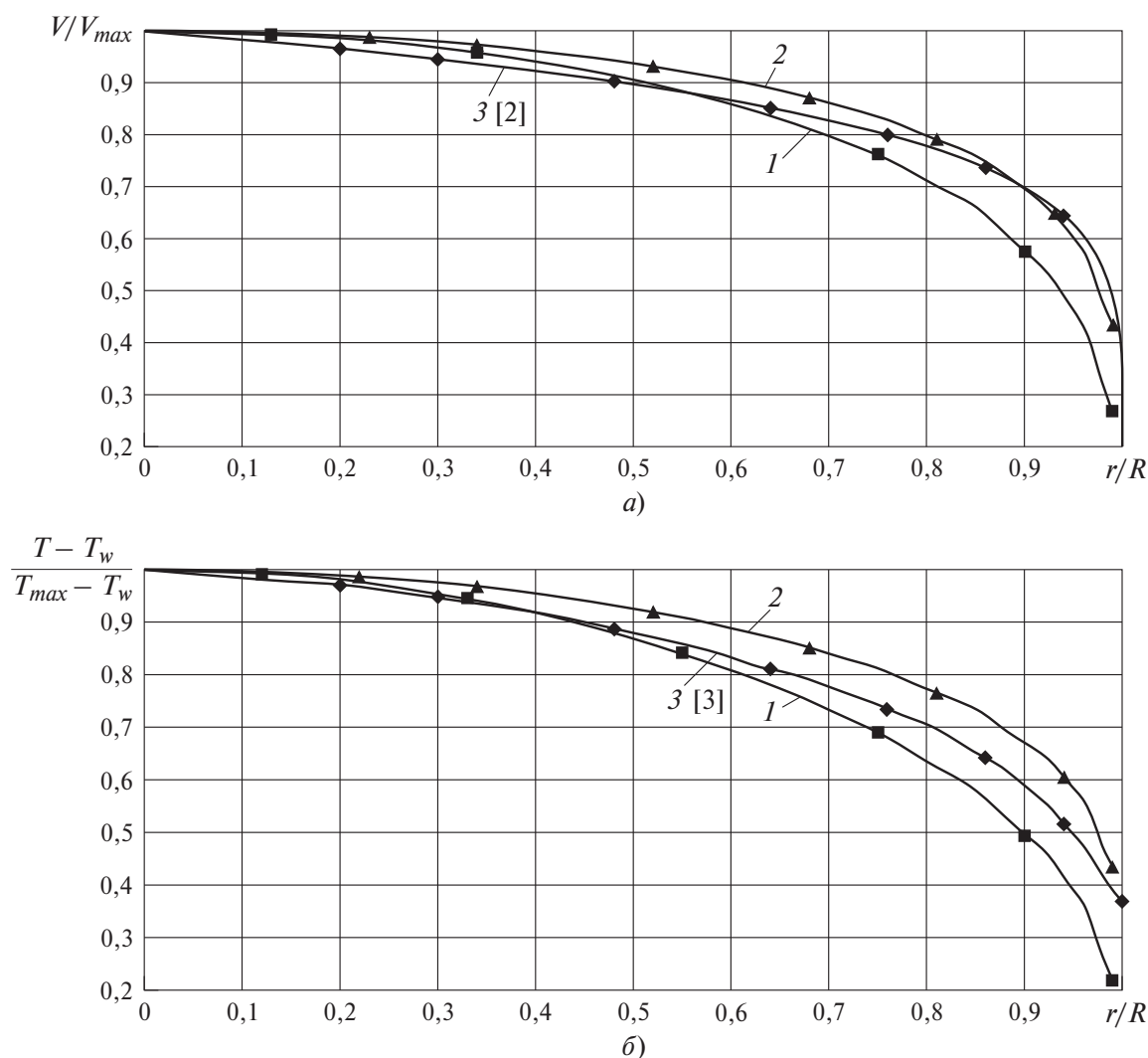


Рис. 2. Графики распределения безразмерной скорости (а) и температуры (б) в трубе по относительному радиусу r/R : 1 и 2 — результаты численных экспериментов с граничными условиями на стенке, соответствующими течению в шероховатой и гидравлически гладкой трубах; 3 — экспериментальное распределение согласно [2, 3]

скорости составляет 3,3 %, безразмерной температуры — 6,2 %. Погрешность резко возрастает и принимает максимальное значение вблизи стенки. Это можно объяснить тем, что количество ячеек расчетной сетки в использованном программном комплексе FlowVision не позволяет с высокой точностью рассчитать параметры в пограничном слое.

Разработанная методика определения режимов, при которых отсутствует конденсатообразование в дымовых трубах, с привлечением методов численного моделирования на основе системы дифференциальных уравнений Навье — Стокса, уравнения энергии, уравнений турбулентного переноса позволяет решать задачи прогнозирования на этапе

проектирования объектов с дымовыми трубами и выбирать режимы эксплуатации действующих труб. Она может быть использована в жилищно-коммунальном хозяйстве, теплоэнергетике, нефтяной и других отраслях народного хозяйства.

Список литературы

1. Дужих Ф. П., Осоловский В. П., Ладыгичев М. Г. Промышленные и вентиляционные трубы: Справочное издание / Под ред. Ф. П. Дужих. — М.: Теплотехник, 2004.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1974.
3. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. — М.: Дрофа, 2003.

hvorenkovDA@mail.ru