

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по теплообменникам. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – Т. 1. – 550 с.
2. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов: СНиП 2.04.14–88. – М.: Госстрой СССР, 1990.
3. Техническая термодинамика. Ч. II / Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 560 с.

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 4.04.2008

УДК 621.311.22

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ДЫМОВЫХ ТРУБ С ПРИЖИМНОЙ ФУТЕРОВКОЙ

Докт. техн. наук, проф. СТРИХА И. И.

РУП «БЕЛТЭИ»

Дымовые трубы (ДТ) многих тепловых электрических станций и котельных эксплуатируются в нерасчетных режимах по объему, температуре и составу отводимых газов. При проектировании ДТ и привязке их к конкретным энергетическим объектам конструктивные параметры и режимы теплового состояния футеровки и несущего ствола обычно устанавливаются для стационарных условий работы.

На ТЭС и котельных наиболее распространены ДТ с прижимной футеровкой, в которых несущий ствол выполнен из железобетона, а газоотводящий ствол – из кислотоупорного кирпича или других материалов, например из полимерсиликатбетона. Основными контролируемыми параметрами, по которым определяются условия надежной эксплуатации ДТ, являются: перепад температур по толщине футеровки (не более 80 град.), температура внутренней поверхности футеровки (не ниже точки росы водяных паров продуктов сгорания – для природного газа и паров серной кислоты – при сжигании мазута), а также температура внутренней поверхности железобетонного ствола (не выше 373 К) [1].

Обследование и анализ технического состояния футеровок и несущих стволов ДТ показали, что значительная часть из них имеет дефекты, которые вызваны отступлением как от существующих нормативов при выполнении строительно-монтажных работ, так и от оптимальных значений режимных параметров при эксплуатации [2].

На большинстве дымовых труб с футеровкой из кислотоупорного кирпича при работе котлов на природном газе и частично на мазуте практически не наблюдается разрушений основного материала футеровки за счет низкотемпературной коррозии. Отмечается разрушение материала швов и антикоррозионных покрытий футеровки преимущественно вследствие термических деформаций, вызываемых недопустимыми температурными

напряжениями из-за превышения нормативных значений перепадов температур по толщине материала, а также из-за перекосов температур газов внутри газоотводящего ствола. В отдельных случаях происходят локальные вспучивания швов и кирпичной кладки в результате воздействия на них дымовых газов, содержащих сернистые соединения. Разрушение футеровки за счет термических деформаций происходит не только в установившемся режиме, но и в периоды их пуска и останова при несоблюдении технологического регламента этих операций.

Согласно данным [3], разность температур, при которой образуются трещины в бетоне, не зависит от его марки. Определяющий фактор трещинообразования в бетоне – напряжение, которое является функцией отношения предела прочности бетона к степени армирования. С повышением этого показателя трещиностойкость материалов трубы усиливается.

Образование трещин в футеровке и несущем стволе дымовой трубы происходит также за счет неравномерного распределения температур на их поверхности [4]. Быстрая смена температур при пуске, останове и неравномерность расширения материала элементов трубы по их окружности вызывают соответствующие изменения напряжений сжатия и изгиба, которые приводят к отклонению ствола трубы от вертикали и появлению в ней трещин. Одной из причин образования дополнительных трещин в футеровке является различие значений коэффициентов температурного расширения ее и материала несущего ствола.

Для обеспечения длительной надежной эксплуатации ДТ в нерасчетных режимах необходимо выполнять поверочные тепловые расчеты с определением приведенных выше контролируемых параметров. Основные положения методик по тепловым расчетам ДТ различных конструкций в стационарных условиях работы указаны в [5]. Эти методики получили дальнейшее развитие для определения теплового состояния элементов ДТ при их пусках и остановах, а также нерасчетных режимах эксплуатации [6].

В соответствии с существующими методиками тепловые расчеты дымовых труб осуществляются по зонам, количество которых принимается в зависимости от высоты газоотводящего стола и его конструктивных особенностей. Выполняются вариантные расчеты для минимально возможного объема отводимых газов.

Теплотехнический расчет ДТ для стационарных условий работы сводится к определению значений температур по толщине многослойной стенки ствола трубы в каждой зоне. Схематически часть одной из расчетных зон представлена на рис. 1.

Для дымовой трубы с прижимной футеровкой температура на границе любых двух слоев определяется по формуле

$$t_i = t_r - q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^i \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где t_r – температура уходящих газов, $^\circ\text{C}$; q – плотность теплового потока через конструкцию дымовой трубы, $\text{ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; α_1 – коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к конструкции газоотводящего канала,

ккал/(м²·ч·К); δ_i – толщина i -го конструктивного слоя, м; λ_i – коэффициент теплопроводности i -го конструктивного слоя, ккал/(м·ч·К).

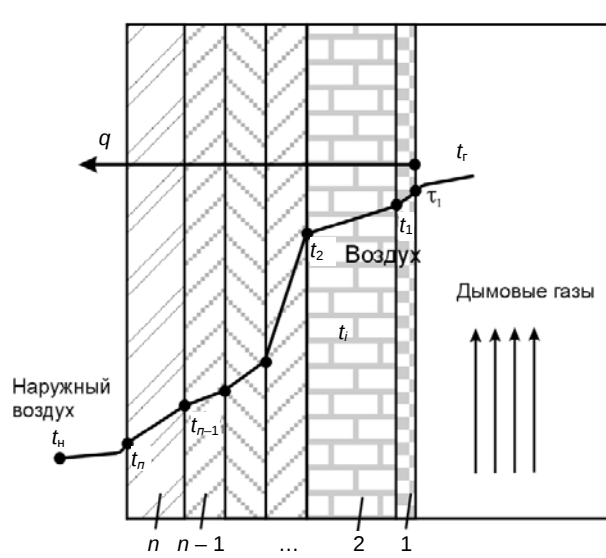


Рис. 1. Схема теплообмена в дымовой трубе с прижимной футеровкой: 1, 2, ..., $n-1$, n – номера слоев конструкции трубы; q – тепловой поток через ограждающую конструкцию; t_1 – температура внутренней поверхности конструкции дымовой трубы; t_1 , t_2 , t_{n-1} , t_n – то же на границе конструктивных слоев; t_n – то же наружного воздуха; t_r – то же дымовых газов

Плотность теплового потока через конструкцию футеровки и несущего ствола определяется по формуле

$$q = \frac{t_r - t_n}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_n}}, \text{ ккал/}(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (2)$$

В [7] указывается, что охлаждение газов в ДТ при их температуре ниже 200 °С (473 К) и скорости более 10–15 м/с можно не учитывать, и в расчетах температура газов по высоте принимается постоянной. Однако при снижении нагрузок котельных агрегатов происходит уменьшение объемов отводимых газов, что приводит к снижению их скорости ниже 10–15 м/с и за счет этого к более существенному снижению температуры.

Конечная температура газов на выходе из расчетной зоны определяется по формуле

$$t_x = t_n + (t_{r0} - t_n) e^{\frac{-\pi d k H_3}{G_r c_r}}, \text{ К}, \quad (3)$$

где t_{r0} – температура газов в начале расчетного участка, К; t_{cp} – средняя температура наружного воздуха, К; k – коэффициент теплопередачи конструкции дымовой трубы, ккал/(м²·ч·К); H_3 – высота расчетной зоны, м; G_r – расход дымовых газов, кг/ч; c_r – удельная теплоемкость дымовых газов, ккал/(кг·К).

При расчете показателей теплообмена в газоотводящем стволе для определения критерия Nu используется выражение

$$Nu = 0,032 Re^{0,8} Pr^{0,3} \left(\frac{d}{H_3} \right)^{0,054}. \quad (4)$$

Коэффициент теплоотдачи от железобетонного ствола к наружному воздуху при скорости ветра $W_n > 1$ м/с определяется по формуле

$$\alpha_n = 6,3 W_n^{0,66} \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}) = 7,3 W_n^{0,66} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}). \quad (5)$$

Коэффициент теплопроводности железобетонного ствола может находиться в зависимости от плотности бетона следующим образом:

$$\lambda_6 = 0,25 \rho_6^{2,13} \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{K}) = 0,29 \rho_6^{2,13} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K}), \quad (6)$$

где ρ_6 – плотность бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для действующих дымовых труб, рассчитанных на соответствующую температуру отводимых газов в стационарных режимах, нужно дополнительно устанавливать значения температур дымовых газов, направляемых в трубу при их пусках, а также определять тепловые режимы их останова.

Нестационарность тепловых процессов в дымовых трубах при их пусках обуславливается изменением теплового состояния футеровки. В начальный период подачи дымовых газов в газоотводящий ствол происходит подъем температуры внутренней поверхности футеровки, а затем после прогрева поверхностного ее слоя повышается температура внутри футеровки до наступления теплового равновесия.

Решение задачи нестационарной теплопроводности для рассматриваемых условий – это, прежде всего, установление зависимости изменения температуры и количества передаваемой теплоты во времени в любой точке футеровки. Нестационарный перенос теплоты в дымовых трубах возникает относительно кратковременно в периоды их пуска и останова или при существенном изменении температуры отводимых газов, происходящем в результате пуска котлов с резко отличающейся температурой уходящих газов в сравнении с другими котлами.

Во время длительного простоя ДТ материал ее несущего ствола и футеровки охлаждается до температуры наружного воздуха. При пуске ДТ, как и в стационарных условиях работы, происходят охлаждение ее элементов со стороны наружной поверхности несущего ствола и нагрев со стороны внутренней поверхности футеровки дымовыми газами. При этом происходит несимметричный прогрев элементов ДТ из-за различий в количестве подводимой теплоты с обеих сторон и теплофизических свойств материалов. В условиях пуска ДТ в зимнее время, в особенности при низких значениях температур наружного воздуха, перепад температур по толщине слоев футеровки и несущего ствола достигает максимальных значений, что приводит к протеканию процесса трещинообразования.

В период пуска ДТ происходит перемещение значений температур футеровки и оболочки до достижения нейтральной плоскости. Местоположение этой плоскости меняется по мере прогрева футеровок и значений температур газового и воздушного потоков.

Существует решение задач процессов нестационарной теплопроводности для плоской и цилиндрической стенок с внешним подводом теплоты. Однако определение значений температур по слоям элементов ДТ с использованием известных уравнений нестационарного теплообмена для ДТ представляется достаточно сложным. Поэтому решение поставленной задачи нуждается в существенном упрощении с учетом требований к рассматриваемым объектам. Нестационарный режим работы дымовой трубы обусловлен изменением температуры ее элементов (футеровки и несущего ствола) до достижения теплового равновесия. В соответствии с поставленной задачей при заданной скорости подъема температуры дымовых газов можно определить первоначальное ее значение, а затем по предельному значению температуры отводимых газов установить время достижения теплового равновесия при выходе на стационарный режим работы дымовой трубы при условии неперевышения заданного нормативного перепада температур по толщине футеровки. При этом скорость прогрева должна быть на уровне, обеспечивающем предотвращение возникновения опасных термических напряжений, которые могут привести к разрушению материала футеровки.

Режим разогрева дымовых труб зависит от способа их возведения, длительности простоя и сезона года. Согласно [8] при кратковременной остановке просушенной трубы (до 10 дней летом и 5 дней зимой) прогрев ее до рабочей температуры должен осуществляться со скоростью не более 25 град/ч. При простое дымовой трубы более 10 дней летом и 5 дней зимой этот же показатель составляет соответственно 10 и 5 град/ч.

Процесс нагрева футеровки дымовой трубы дымовыми газами рассматривается с одновременным охлаждением несущего ствола наружным воздухом. В любой произвольный момент времени, когда температура воздуха равна t_n , разность температур на входе $\Delta t_0 = t_{го} - t_n$, на выходе $\Delta t_k = t_{гк} - t_n$.

Средняя разность температур в расчетной зоне

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_0 - \Delta t_k}{\ln \frac{\Delta t_0}{\Delta t_k}} = \frac{t_{го} - t_{гк}}{\ln \frac{t_{го} - t_n}{t_{гк} - t_n}}. \quad (7)$$

Количество теплоты, переданное от дымовых газов в трубе за любой промежуток времени во время ее прогрева или в установившихся условиях работы, находится по формуле

$$dQ = kF \frac{t_{го} - t_{гк}}{\ln \frac{t_{го} - t_n}{t_{гк} - t_n}} d\tau. \quad (8)$$

Коэффициент теплопередачи k , как известно, определяется следующим образом:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (9)$$

При массовом расходе дымовых газов G_Γ то же количество теплоты dQ находится следующим образом:

$$dQ = G_\Gamma c_\Gamma (t_{\Gamma 0} - t_{\Gamma K}) d\tau = W_\Gamma (t_{\Gamma 0} - t_{\Gamma K}) d\tau = kF \frac{t_{\Gamma 0} - t_{\Gamma K}}{\ln \frac{t_{\Gamma 0} - t_H}{t_{\Gamma K} - t_H}} d\tau, \quad (10)$$

где $W_\Gamma = G_\Gamma c_\Gamma$ – водяной эквивалент дымовых газов.

Откуда:

$$\frac{kF}{W_\Gamma} = \ln \frac{t_{\Gamma 0} - t_H}{t_{\Gamma K} - t_H} = \ln \frac{\Delta t_0}{\Delta t_K} = \ln A; \quad (11)$$

$$\frac{t_{\Gamma 0} - t_H}{t_{\Gamma K} - t_H} = A. \quad (12)$$

При $k = \text{const}$ и $A = \text{const}$ имеем:

$$t_{\Gamma K} = t_H + (t_{\Gamma 0} - t_H) e^{-kF/W_\Gamma} \quad (13)$$

или

$$t_{\Gamma K} = \frac{\Delta t_0}{A} + t_H. \quad (14)$$

Тогда

$$dQ = W_\Gamma \left(t_{\Gamma 0} - \frac{\Delta t_0}{A} - t_H \right) d\tau = G_\Phi c_\Phi (t_{\text{co}} - t_{\text{ck}}). \quad (15)$$

Откуда:

$$W_\Gamma \frac{A-1}{A} (t_{\Gamma 0} - t_H) d\tau = W_\Phi (t_{\text{co}} - t_{\text{ck}}); \quad (16)$$

$$t_{\Gamma 0} = \frac{A}{A-1} \frac{W_\Phi}{W_\Gamma} \frac{t_{\text{co}} - t_{\text{ck}}}{\tau} + t_H. \quad (17)$$

При прогреве футеровки дымовой трубы в период ее пуска показатели A и k изменяются. Поэтому при выполнении расчетов за каждый промежуток времени необходимо учитывать изменение параметров теплового состояния элементов трубы. В начальный период прогрева футеровки дымовой трубы при ее пуске можно считать, что коэффициент теплопередачи равен коэффициенту теплоотдачи, т. е. $k \approx \alpha_1$.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией от газов к футеровке в любой момент времени может быть найден из приведенного выше уравнения (4) для определения критерия Nu .

Для ориентировочных расчетов конвективную составляющую теплоотдачи от газов к футеровке численно можно принять равной скорости дымовых газов [5]. Для газового потока с температурой более 100 °С (373 К) доля лучистой теплоотдачи соизмерима с конвективной составляющей согласно результатам, приведенным в [5]:

$$\alpha_{\text{л}} = 6 + 0,06(t_{\text{го}} - 100) \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}) = 7 + 0,07(t_{\text{го}} - 100) \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}). \quad (18)$$

По высоте дымовой трубы с конусообразным газоотводящим стволом изменяется сечение для пропуска дымовых газов, что влечет за собой изменение коэффициента теплоотдачи. В любом сечении трубы с диаметром d_i изменение коэффициента теплоотдачи по отношению к таковому в устье трубы может быть найдено по формуле

$$\alpha_{1i} = \alpha_{1y} \left(\frac{d_y}{d_i} \right)^{1,8}. \quad (19)$$

Передача теплоты через плоскую стенку для стационарных условий эксплуатации дымовой трубы может быть определена следующим образом:

$$q = \alpha_1(t_{\text{го}} - t_{\text{co}}) = \alpha_2(t_{\text{г}} - t_{\text{н}}) = \frac{\lambda}{\delta}(t_{\text{co}} - t_{\text{г}}) = k(t_{\text{г}} - t_{\text{н}}), \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (20)$$

В начальный период разогрева дымовой трубы (нестационарный режим) тепловая энергия расходуется на изменение температуры внутренней поверхности футеровки с последующим ее прогревом и достижением определенного перепада температур по ее толщине. С учетом (20) t_{co} можно определить по формуле

$$t_{\text{co}} = t_{\text{го}} - q \frac{1}{\alpha_1}. \quad (21)$$

На основании изложенного выше можно считать, что в начальный период разогрева трубы температура внутренней поверхности футеровки приближается к температуре дымовых газов ($t_{\text{co}} \approx t_{\text{го}}$). При условии отсутствия трещинообразования в футеровке температура внутренней поверхности футеровки должна отвечать разности температур по ее толщине, но должна быть не выше нормативного значения.

При пуске трубы после длительного простоя в летнее время начальная температура футеровки может быть принята на уровне $t_{\text{го}} = t_{\text{co}}^{\text{H}} = 100^\circ\text{C}$ (373 K); в зимнее время – $t_{\text{го}}^{\text{H}} = t_{\text{co}}^{\text{H}} = 70^\circ\text{C}$ (343 K). Затем по известным значениям скорости подъема температур дымовых газов, а соответственно и скорости прогрева футеровки можно представить изменение температуры дымовых газов при пуске дымовой трубы из разного состояния

$$t_{\text{го},i} = t_{\text{го}}^{\text{H}} + mT_{\text{п}}, \quad (22)$$

где m – скорость подъема температуры газов, град/ч; $T_{\text{п}}$ – длительность пуска трубы.

При этом предельное (граничное) значение $t_{\text{го}}$ отвечает усредненной температуре отводимых газов от котлов t_{yx} .

С учетом изложенного выше имеем

$$T_{\text{п}} = \frac{t_{\text{yx}}^{\text{cp}} - t_{\text{го}}^{\text{H}}}{m}, \text{ ч}. \quad (23)$$

При останове дымовой трубы снижение температуры ее футеровки должно быть постепенным до достижения значения температуры газов, равной t_r^H . В целом темп охлаждения при останове должен соответствовать темпу ее прогрева при пуске. Для практической реализации режимов пуска или останова дымовой трубы нужно предусматривать возможность подъема или снижения температуры отводимых газов с заданной скоростью, например путем присадки соответствующего количества холодного воздуха в газовый тракт дымовой трубы. При достижении теплового равновесия в условиях стационарных режимов работы дымовой трубы воздействие на температуру отводимых газов прекращается.

При разогреве дымовой трубы после непродолжительного простоя (до 10 дней летом и 5 дней зимой) температура дымовых газов, подаваемых в трубу, находится по формуле:

$$t_{ri} = t_{rn} + 25T_n. \quad (24)$$

Разогрев дымовой трубы при более длительном простое осуществляется при изменении температуры дымовых газов по зависимости:

- зимой

$$t_{ri} = 70 + 5T_n, \text{ } ^\circ\text{C} = 343 + 5T_n, \text{ K}, \quad T_n = \frac{t_r^K - 70}{5}, \text{ ч}; \quad (25)$$

- летом

$$t_{ri} = 100 + 10T_n, \text{ } ^\circ\text{C} = 373 + 10T_n, \text{ K}, \quad T_n = \frac{t_r^K - 100}{10}, \text{ ч}. \quad (26)$$

Для дымовых труб с вентилируемым зазором параметры теплового состояния в значительной степени зависят от температуры воздуха в зазоре. Поэтому для таких дымовых труб во избежание возникновения опасных термических напряжений при их пуске в начальный период целесообразно осуществлять подогрев воздуха в калориферах до 70–80 °C (343–353 K). Затем по мере снижения температуры отводимых газов следует соответственно уменьшать температуру воздуха в вентилируемом зазоре.

Для этих условий:

$$\left. \begin{aligned} t_{ri} &= t_{yx} - mT_n, \quad m = 10 \text{ (летом)}, \\ t_{вз} &= t_{вз}^H - mT_n, \quad m = 5 \text{ (зимой)}. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

По изложенным выше методикам разработана программа для выполнения поверочных тепловых расчетов ДТ во всережимных условиях эксплуатации. В перечне исходных данных должны быть приведены основные сведения о конструктивных размерах всех слоев элементов ДТ по каждой из расчетных зон, а также теплотехнические характеристики материалов.

В настоящей работе приведены результаты поверочных тепловых расчетов двух ДТ с прижимной футеровкой из силикатополимербетона (ПСБ). Этот материал обладает высокой кислотостойкостью (96 %) и проницаемостью газов и жидкости по толщине слоя материала. Поэтому футеровка из ПСБ обычно выполняется многослойной с покрытием внутренней поверхности самоуплотняющим раствором и созданием оболочки толщиной до

30 мм, практически не проницаемой для газов, паров и конденсата из продуктов сгорания.

В результате теплового расчета формируются в графической и (или) табличной форме с указанием по каждой зоне, начиная с устья трубы, значений температур внутренней поверхности и по слоям футеровки, а также на поверхностях несущего железобетонного ствола. Программа теплового расчета позволяет определить зоны по высоте футеровки с минимальными значениями температур на ее поверхности и сравнить с температурой точки росы дымовых газов, а также установить зоны с максимальными значениями перепада температур по толщине слоев футеровки.

Если в результате проведения теплотехнического расчета окажется, что требуемые параметры по условиям надежности (перепад температур по толщине футеровки меньше 80 град., значения температур внутренней стенки конструкции футеровки выше точки росы и на внутренней поверхности железобетонного ствола до 100 °С (373 К)) не обеспечиваются, то изменяют значения температур отводимых газов и осуществляют расчеты до тех пор, пока эти условия будут достигнуты.

Рассмотрены тепловые режимы ДТ с техническими характеристиками: $H = 180$ м; $d_y = 8,4$ м; $t_r = 110\text{--}135$ °С (383–408 К) (на природном газе); $t_r = 150\text{--}197$ °С (423–470 К) (мазут); объем отводимых газов: при сжигании природного газа от 120 до 1380 м³/с; при работе на мазуте – от 430 до 860 м³/с. Основные исходные данные теплотехнических свойств материалов ДТ для вариантных расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные по дымовой трубе

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Значение
Высота трубы	H	м	180,0
Коэффициент теплопроводности:			
• внутреннего слоя конструкции футеровки (обмазки) $\delta_{фв} = 0,003$ м	$\lambda_{фв}$	ккал/(м·ч·К)	1,00
		Вт/(м·К)	1,16
• футеровки ПСБ $\delta_{ф} = 0,20\text{--}0,35$ м	$\lambda_{ф}$	»	0,43
• наружного слоя конструкции футеровки (изоляция – минераловатные плиты) $\delta_{фн} = 0,04$ м	$\lambda_{фн}$	»	0,051
• внутреннего слоя конструкции железобетонного ствола (изоляция – битумы) $\delta_{фв} = 0,03$ м	$\lambda_{бв}$	»	0,23
• железобетонного ствола $\delta_{фв} = 0,2$ м	$\lambda_{б}$	»	1,45
• наружного слоя конструкции железобетонного ствола $\delta_{н} = 0,002$ м	$\lambda_{н}$	»	0,57
Температура уходящих газов	t_r	°С	120; 140; 170
		К	393; 413; 443
Объем отводимых газов	V_r	м ³ /с	120; 175; 250; 375; 1380
Температура наружного воздуха	t_n	°С	–30; 0; 30
		К	243; 273; 303
Коэффициент избытка воздуха за дымососом	α	–	1,466
Скорость ветра	W_n	м/с	4,6

Отдельные результаты тепловых расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные результаты вариантных поверочных тепловых расчетов дымовой трубы

Показатели	Отметки зоны, м	Температура наружного воздуха, °C									
		-30	0	30	-30	0	0	-30	0	30	
		Температура отводимых газов t_r									
		120 °C (393 K)			140 °C (413 K)			170 °C (443 K)			
		$V_r = 120 \text{ м}^3/\text{с}$									
τ_1 , °C		$W_y = 3,1 \text{ м/с}$			$W_y = 3,3 \text{ м/с}$			$W_y = 3,5 \text{ м/с}$			
	175	104,3	107,4	110,6	122,5	125,6	128,6	149,8	152,8	155,9	
	5	92,2	97,8	103,3	109,0	114,4	119,9	134,3	139,7	145,0	
Δt_{Φ} , град	175	39,5	31,6	23,7	44,8	36,9	29,0	52,9	44,9	37,0	
	5	46,1	36,9	27,6	52,4	43,1	33,9	62,0	52,7	43,4	
t_6 , °C	175	-13,1	13,5	40,2	-10,8	15,8	42,4	-7,3	19,3	45,9	
	5	-7,3	18,1	43,6	-4,2	21,2	46,7	0,5	25,9	51,3	
τ_1 , °C		$V_r = 175 \text{ м}^3/\text{с}$									
		$W_y = 4,6 \text{ м/с}$			$W_y = 4,8 \text{ м/с}$			$W_y = 5,1 \text{ м/с}$			
	175	108,2	110,6	112,9	126,8	129,2	131,5	154,9	157,1	159,4	
	5	98,4	102,7	107,1	115,9	120,2	124,4	142,4	146,5	150,6	
	t_{Φ} , град	175	40,6	32,5	24,4	46,1	38,0	29,8	54,3	46,2	38,0
		5	48,4	38,7	29,0	55,0	45,3	35,6	65,0	56,2	45,5
	t_6 , °C	175	-12,6	13,9	40,5	-10,2	16,3	42,8	-6,7	19,8	46,3
		5	-6,2	19,1	44,3	-2,9	22,3	47,5	2,0	27,2	52,4
	τ_1 , °C		$V_r = 250 \text{ м}^3/\text{с}$								
		$W_y = 6,5 \text{ м/с}$			$W_y = 6,8 \text{ м/с}$			$W_y = 7,3 \text{ м/с}$			
175		111,1	112,9	114,6	130,0	131,8	133,5	158,5	160,2	162,0	
5		103,2	106,5	109,9	121,2	124,5	127,9	148,5	151,7	154,9	
t_{Φ} , град		175	41,5	33,2	24,9	47,0	38,7	30,4	55,4	47,1	38,8
		5	50,2	40,2	30,1	57,0	46,9	36,9	67,3	57,2	47,1
t_6 , °C		175	-12,2	14,2	40,7	-9,8	16,6	43,0	-6,2	20,2	46,6
		5	-5,3	19,8	44,8	-1,9	23,1	48,2	3,1	28,1	53,2
τ_1 , °C			$V_r = 375 \text{ м}^3/\text{с}$								
		$W_y = 9,7 \text{ м/с}$			$W_y = 10,2 \text{ м/с}$			$W_y = 11,0 \text{ м/с}$			
	175	113,5	114,8	116,1	132,8	134,0	135,3	161,7	162,9	164,2	
	5	107,4	110,0	112,5	126,8	128,5	130,9	154,0	156,4	158,8	
	Δt_{Φ} , град	175	42,2	33,7	25,3	47,8	39,4	31,0	56,3	47,9	39,4
		5	51,8	41,4	31,1	58,8	48,4	38,1	69,3	58,9	48,5
	t_6 , °C	175	-11,9	14,5	40,9	-9,5	16,9	43,3	-5,8	20,5	46,9
		5	-4,5	20,4	45,3	-1,1	23,8	48,7	4,1	29,0	53,9
	τ_1 , °C		$V_r = 1380 \text{ м}^3/\text{с}$								
		$W_y = 35,8 \text{ м/с}$			$W_y = 37,8 \text{ м/с}$			$W_y = 40,4 \text{ м/с}$			
175		117,7	118,2	118,6	137,5	137,9	138,4	167,1	167,5	168,0	
5		115,3	116,3	117,2	134,8	135,7	136,6	164,0	164,9	165,8	
Δt_{Φ} , град		175	43,4	34,7	26,1	49,2	40,5	31,9	57,9	49,2	40,6
		5	54,8	43,8	32,9	62,1	51,2	40,2	73,1	62,2	51,2
t_6 , °C		175	-11,4	14,9	41,2	-8,9	17,4	43,7	-5,2	21,1	47,4
		5	-3,0	21,6	46,2	0,6	25,2	49,8	6,0	30,6	55,2

По результатам выполненных расчетов можно отметить, что ни в одной из расчетных зон параметры теплового состояния элементов ДТ не превышают установленных нормативов. В то же время при небольших объемах отводимых газов ($120\text{--}175\text{ м}^3/\text{с}$) из-за низких значений их скорости возникает опасность самоокутывания оголовка дымовой трубы практически при всех погодных условиях, кроме штиля. Для $V_r = 250\text{ м}^3/\text{с}$ опасными являются скорости ветра ниже $3,5\text{ м/с}$, для $V_r = 375\text{ м}^3/\text{с}$ – ниже 5 м/с . При максимальном расчетном объеме отводимых газов $V_r = 1380\text{ м}^3/\text{с}$ условия самоокутывания не создаются.

В качестве другого примера рассмотрены расчетные тепловые режимы дымовой трубы ($H = 240\text{ м}$; $d_y = 9\text{ м}$) с железобетонным несущим стволом и футеровкой из ПСБ. В соответствии с проектом на рассматриваемую дымовую трубу ее основные характеристики: температура отводимых газов – от 90 до 117 °C ($363\text{--}390\text{ К}$) – на природном газе и $145\text{--}165\text{ °C}$ ($418\text{--}438\text{ К}$) на мазуте; точка росы водяных паров дымовых газов – 52 °C (325 К); паров серной кислоты – 145 °C (418 К), объем отводимых газов – $80\text{ м}^3/\text{с}$ (минимум) и $1100\text{ м}^3/\text{с}$ (максимум). За непродолжительный период эксплуатации дымовой трубы с частыми пусками и остановами, пониженным объемом отводимых газов (до $20\text{--}25\%$ от номинального), наличием повышенных присосов воздуха по газовому тракту на внешней поверхности несущего ствола образовались многочисленные кольцевые трещины шириной раскрытия $2\text{--}3\text{ мм}$.

Повышение надежности работы дымовых труб при отклонении от предусмотренных проектом их тепловлажностного и аэродинамического режимов может быть достигнуто путем установления и оперативного контроля расчетных оптимальных значений режимных параметров теплового состояния газоотводящего ствола и футеровки для складывающихся условий эксплуатации.

Для определения температурного режима футеровки и несущего ствола трубы проводились поверочные расчеты для различных вариантов эксплуатации. Расчет проводился при объеме отводимых газов $V_r = 80; 180; 320$ и $1100\text{ м}^3/\text{с}$ и их температуре $t_{yx} = 90; 110; 130; 160; 190\text{ °C}$ ($363; 383; 403; 433; 463\text{ К}$) и температуре наружного воздуха $t_n = -30; -15; 0; 15; 30\text{ °C}$ ($243; 258; 273; 288; 303\text{ К}$). Рассматривались варианты работы ДТ при работе присоединенных к ней котлов на мазуте. Основные геометрические размеры ДТ – толщина стенки бетона и футеровки соответственно – $0,22$ и $0,18\text{ м}$ с отметкой от 240 до 180 м ; от $0,24$ до $0,6$ и от $0,2$ до $0,35\text{ м}$ с отм. от 160 до 5 м . Внутренний диаметр газоотводящего ствола по высоте трубы одинаковый (9 м) с отметкой от 240 до 180 м и изменяется от $9,78$ до $22,9\text{ м}$ с отм. от 160 до 5 м .

Полученные с помощью программ расчета [6] показатели тепловых режимов элементов трубы во всех рассмотренных вариантах ее эксплуатации позволили установить распределение температуры поверхности стенки футеровки по высоте трубы с выделением минимальных значений и перепада температуры по толщине футеровки в каждой зоне с выделением максимального значения в одной из зон. Позонное определение параметров надежной работы ДТ (перепад температур по футеровке до 80 град и темпе-

ратура внутренней стенки выше точки росы) позволило выделить неблагоприятные зоны при различных режимах работы.

Режим 1. $V_r = 80 \text{ м}^3/\text{с}$:

$$t_{yx} = 90\text{--}190 \text{ }^\circ\text{C} (363\text{--}463 \text{ K}); t_n = (-30)\text{--}(+30) \text{ }^\circ\text{C} (243\text{--}303 \text{ K}).$$

При этих условиях работы ДТ при сжигании природного газа и температуре уходящих газов $90\text{--}130 \text{ }^\circ\text{C}$ ($363\text{--}403 \text{ K}$) как в зимнее время, так и в летнее, создаются условия для конденсации водяных паров. Учитывая то, что при снижении температуры поверхности материала газового тракта ниже точки росы продуктов сгорания природного газа ($t_{т.р} = 52\text{--}56 \text{ }^\circ\text{C} = 325\text{--}329 \text{ K}$) наступает процесс конденсации водяных паров, самым благоприятным режимом при этой нагрузке можно считать режим с температурой уходящих газов $130 \text{ }^\circ\text{C}$ (403 K). При условии эксплуатации с $t_{yx} = 160\text{--}190 \text{ }^\circ\text{C}$ ($433\text{--}463 \text{ K}$) процесс конденсации водяных паров и паров серной кислоты из дымовых газов не будет наблюдаться. Однако перепад температур по футеровке превысит 80 град. при $t_{yx} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ (433 K) и температурах наружного воздуха $t_{н.в} = -(15\text{--}30) \text{ }^\circ\text{C} = 258\text{--}243 \text{ K}$, а такая же ситуация будет иметь место при $t_{yx} = 190 \text{ }^\circ\text{C}$ (463 K) и $t_{н.в} = (+15)\text{--}(-30) \text{ }^\circ\text{C} = 288\text{--}243 \text{ K}$ уже начиная с отм. $75,00 \text{ м}$.

Режим 2. $V_r = 180 \text{ м}^3/\text{с}$:

$$t_{yx} = 90\text{--}190 \text{ }^\circ\text{C} (363\text{--}463 \text{ K}); t_n = -30\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C} (243\text{--}303 \text{ K}).$$

При эксплуатации ДТ в этом режиме температура внутренней поверхности стенки футеровки выше точки росы дымовых газов во всех рассматриваемых вариантах. Однако уже при температуре отводимых газов $130 \text{ }^\circ\text{C}$ (403 K) возникают перепады температур по футеровке выше 80 град. при температуре наружного воздуха $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ (258 K) и $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ (243 K) в верхней части ДТ. При $t_{yx} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ (433 K) перепады температуры по толщине футеровки превышают 80 град. уже с отметки трубы $35,00\text{--}55,00 \text{ м}$ в зимнее время и охватывают большую часть расчетных зон при $t_{н.в} = (-15) - (+15) \text{ }^\circ\text{C} = 258\text{--}288 \text{ K}$. Отсутствуют опасные перепады температур по футеровке только при температуре наружного воздуха $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (303 K). Такой режим работы трубы маловероятен длительное время, он возможен только очень короткое время в летний период.

Режим 3. $V_r = 320 \text{ м}^3/\text{с}$:

$$t_{yx} = 90\text{--}190 \text{ }^\circ\text{C} (363\text{--}463 \text{ K}); t_n = -30\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C} (243\text{--}303 \text{ K}).$$

При таком режиме эксплуатации температура внутренней поверхности стенки футеровки выше точки росы при всех температурах наружного воздуха и температурах отводимых газов. При $t_{yx} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ (363 K) и $110 \text{ }^\circ\text{C}$ (383 K) перепады температуры по футеровке ниже 80 град. только при температуре воздуха $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ (303 K) в верхней части трубы. Эти режимы и режим при $t_{yx} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ (463 K) в летнее время при температуре наружного воздуха $0\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$ ($273\text{--}303 \text{ K}$) можно считать надежными. При эксплуатации ДТ с $t_{yx} = 160$ и $190 \text{ }^\circ\text{C}$ (433 и 466 K) не обеспечивается требуемая надежность по условиям превышения перепада температуры по толщине слоя футеровки.

Режим 4. $V_r = 1100 \text{ м}^3/\text{с}$:

$$t_{yx} = 90\text{--}190 \text{ }^\circ\text{C} (363\text{--}463 \text{ K}); t_n = (-30)\text{--}(+30) \text{ }^\circ\text{C} (243\text{--}303 \text{ K}).$$

Этот режим работы ДТ возможен только при вводе проектных мощностей присоединенных к ней котлов. При таких условиях эксплуатации температура внутренней стенки конструкции футеровки выше точки росы при всех режимах. В то же время при отводе дымовых газов с температурами $t_{yx} = 160$ и $190 \text{ }^\circ\text{C}$ (433 и 463 K) при всех значениях температуры наружного воздуха, а также при $t_{yx} = 110$ и $130 \text{ }^\circ\text{C}$ (383 и 403 K) и $t_n = -15$ и $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ (258 и 243 K) перепад температур по толщине футеровки превышает нормативное значение. Это свидетельствует о недопустимости эксплуатации трубы в таких режимах.

ВЫВОДЫ

1. Приведены основные положения методики тепловых расчетов дымовых труб, которая позволяет установить значения показателей режимов теплового состояния надежной их эксплуатации по условиям трещинообразования в футеровке и несущем стволе при стационарных и нестационарных условиях работы с частыми остановами и пусками при разной длительности простоя.

2. По результатам проведенного численного эксперимента показано, что практически для всех дымовых труб при отклонении условий их эксплуатации от проектных необходимо выполнять поверочные тепловые расчеты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стриха, И. И. Низкотемпературная коррозия и эколого-экономические показатели котельных установок тепловых электростанций / И. И. Стриха. – Минск: НИГП «БЕЛТЭИ», 1998. – 300 с.
2. Стриха, И. И. Повышение надежности дымовых труб тепловых электрических станций / И. И. Стриха // Наука – энергетике: сб. науч. тр. – Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2001. – С. 141–145.
3. Ремонт и наращивание железобетонных и кирпичных дымовых труб (ФРГ) // Энергетика и электрификация, сер. «Теплоэнергетика за рубежом». – М.: Информэнерго, 1987. – Вып. 2. – С. 5–13.
4. Причины отклонения внутренних стволов дымовых труб от вертикали и его предупреждение (США) // Энергетика и электрификация, сер. «Теплоэнергетика за рубежом». – М.: Информэнерго, 1987. – Вып. 4. – С. 11–15.
5. Волков, Э. П. Газоотводящие трубы ТЭС и АЭС / Э. П. Волков, Е. И. Гаврилов, Ф. П. Дужих. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 276 с.
6. Методические указания по теплоаэродинамическому расчету дымовых труб с прижимной футеровкой и вентзазором. РД РБ 09.110.20.520.02; утв. концерном «Белэнерго», 05.08.2002, № 124. – Минск: «БЕЛТЭИ», 2002. – 53 с.
7. Инструкция по теплоаэродинамическому расчету дымовых железобетонных труб с противодавлением в зазоре между стволом и футеровкой. – М.: ЦБНТИ, 1979. – 68 с.
8. Руководство по эксплуатации промышленных дымовых и вентиляционных труб / Комитет РФ по металлургии. – М., 1993. – 102 с.

Представлена лабораторией управления
топливно-энергетическими ресурсами

Поступила 10.01.2008