

*Грес Л.П. – д-р техн. наук, проф., НМетАУ*  
*Миленина А.Е. – мл. научн. сотр., НМетАУ*

## **РАСЧЕТЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ БЛОКА ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С СИСТЕМОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ПРИ ИХ ДВИЖЕНИИ В ДЫМОВОЙ ТРУБЕ**

*Рассмотрены вопросы охлаждения дымовых газов после систем утилизации теплоты при их движении в дымовой трубе блоков воздухонагревателей, с целью обеспечения работы систем утилизации в условиях минимума низкотемпературной сернокислотной коррозии.*

### **Введение**

В конце 2004 г. на доменной печи № 2 ОАО «Запорожсталь» впервые в Украине была введена в работу система утилизации теплоты отходящих дымовых газов, что позволило при исключении природного газа из отопления воздухонагревателей обеспечить температуру горячего дутья 1200 °С.

Так как при отсутствии утилизации теплоты отходящих дымовых газов воздухонагреватели последние имеют среднюю температуру 250 – 270 °С (что значительно выше точки росы промышленных кислот), вопросам присутствия серосодержащих соединений в компонентах горения и продуктах горения доменного газа уделяется мало внимания.

При сжигании доменного газа в воздухонагревателях образуются оксиды серы SO<sub>2</sub> и SO<sub>3</sub>, а также оксиды азота и пары воды. При строительстве комплекса ДП – 2 ОАО «Запорожсталь» установлена дымовая труба для отвода отработанных дымовых газов из воздухонагревателей и рекуператоров системы утилизации теплоты в атмосферу. При общей высоте дымовой трубы 53,35 метров, верхняя часть дымовой трубы высотой 27 м не имеет ни футеровки, ни теплоизоляции. Труба имеет наружный диаметр 3 м, толщиной стенки 0,01 м.

При определении минимальных, с точки зрения низкотемпературной коррозии, температур дымовых газов после систем утилизации, которые определяют КПД рекуператоров, температуры подогрева компонентов горения, площади рекуператоров, необходимо учитывать снижение температуры дымовых газов, в результате их движения в дымопроводах и в дымовой трубе. При регулировании тепловой работой сис-

темы утилизации температуры отходящих из нее дымовых газов и температура стенки дымовой трубы должны быть выше точки росы кислот.

### Постановка задачи

Рассмотрим процесс охлаждения газообразной или жидкой среды, имеющей заданные состав, температуру, давление, при ее движении в результате теплообмена с окружающей средой. Труба может иметь внутреннюю футеровку, либо быть теплоизолирована снаружи, либо не иметь ни того, ни другого. Разделим трубу по длине на участки высотой  $x_n$  метров. В пределах каждого участка значения диаметров и толщин конструкций (футеровка, изоляция, толщина стенки трубы) принимаем средними для участка. Температуры наружного воздуха и дымовых газов и их скорости считаем постоянными для каждого участка. Для  $n$ -го участка имеем одномерную задачу теплопроводности через цилиндрическую стенку при отсутствии внутренних источников теплоты с граничными условиями 3-его рода:

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dt}{dr} = 0, \quad r_{\text{НАР}} \leq r \leq r_{\text{ВНУТР}}; \quad (1)$$

$$-\lambda \cdot \left( \frac{dt}{dr} \right) \Big|_{r=r_{\text{НАР}}} = \alpha_1 \cdot (t_{S1} - t_{\text{НАР}}); \quad (2)$$

$$-\lambda \cdot \left( \frac{dt}{dr} \right) \Big|_{r=r_{\text{ВН}}} = \alpha_2 \cdot (t_{S2} - t_{\text{Д}}), \quad (3)$$

где  $r_{\text{НАР}}$  и  $r_{\text{ВНУТР}}$  – соответственно, наружный и внутренний радиусы трубы с учетом толщины тепловой изоляции и (или) футеровки.

Тепловой поток через единицу длины цилиндрической трубы при теплообмене ее внутренней поверхности с дымовыми газами, а наружной – с атмосферным воздухом, можно определить по формуле:

$$q_{1n} = k_{1n} \cdot \pi \cdot (t_{\text{Д}1n} - t_{\text{В}n}) \cdot x_n, \text{ Вт} \quad (4)$$

где

$$\frac{1}{k_{1n}} = \frac{1}{\alpha_{1n} \cdot d_{1n}} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{2 \cdot \lambda_{i_n}} \cdot \ln \frac{d_{i+1n}}{d_{in}} + \frac{1}{\alpha_{2n} \cdot d_{m+1n}}. \quad (5)$$

Приходящий тепловой поток для каждого участка:

$$Q_{1n} = V_{\text{Д}} \cdot t_{\text{Д}1n} \cdot c_0^{t_{\text{Д}1n}}. \quad (6)$$

Далее вычисляются потери теплоты на участке  $q_1$ . После чего из баланса теплоты для участка методом последовательных приближений определяется конечная температура  $t_{\text{Д}2n}$  дыма на участке:

$$Q_{1n} - q_{1n} = V_{\text{д}} \cdot t_{\text{д}2n} \cdot c_0^{t_{\text{д}2n}}. \quad (7)$$

Для расчета коэффициента теплоотдачи конвекцией при турбулентном вынужденном режиме течения в гладких трубах использовано критериальное уравнение работы [1].

Если дымовая труба имеет футеровку из строительных шероховатых материалов для расчета конвективного теплообмена в трубе с шероховатыми стенками, может быть использовано уравнение [2]:

$$Nu = 0,032 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_{\text{д}}^{0,3} \cdot \bar{\epsilon}_1^{0,054}. \quad (8)$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  от стенки трубы к наружному воздуху определяли, как сумму коэффициента теплоотдачи конвекцией  $\alpha_{2к}$  и коэффициента теплоотдачи излучением  $\alpha_{2л}$ . Коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_{2к}$  при поперечном обтекании одиночной трубы при  $Re > 1000$  рассчитывался либо по критериальному уравнению работы [1], либо согласно расчетной схеме, полученной в [3] из обобщения разнообразных опытных данных, в которой выражения для средней по окружности цилиндра теплоотдачи разбиты на зоны по числам  $Re$ , где показатель степени  $p$  для нагревания набегающего потока принимают равным 0,25, а для охлаждения набегающего потока – 0,2.

Коэффициент теплоотдачи излучением  $\alpha_{2л}$  определялся по известным формулам [4].

### Результаты исследований

Выполнены расчеты охлаждения дымовых газов в дымовой трубе блока воздухонагревателей доменной печи с системой утилизации теплоты. По эксплуатационным данным расход дымовых газов составляет 31 – 40 м<sup>3</sup>/с (режим движения – турбулентный), температура дымовых газов – 116 – 155 °С. Принимали изменение температуры окружающего воздуха -20 – +30 °С, скорости ветра 1 – 10 м/с.

Установлено, что температура стенки рассматриваемого участка дымовой трубы зависит как от температуры окружающего воздуха, так и от его скорости, при равных значениях параметров среды внутри дымовой трубы. Существует область значений температур атмосферного воздуха и скоростей ветра, при которой температура стенки дымовой трубы ниже точки росы водяных паров в дымовых газах. При этом идет конденсация водяных паров на стенке дымовой трубы. На рис. 1 – 2 приведены некоторые результаты численных исследований.

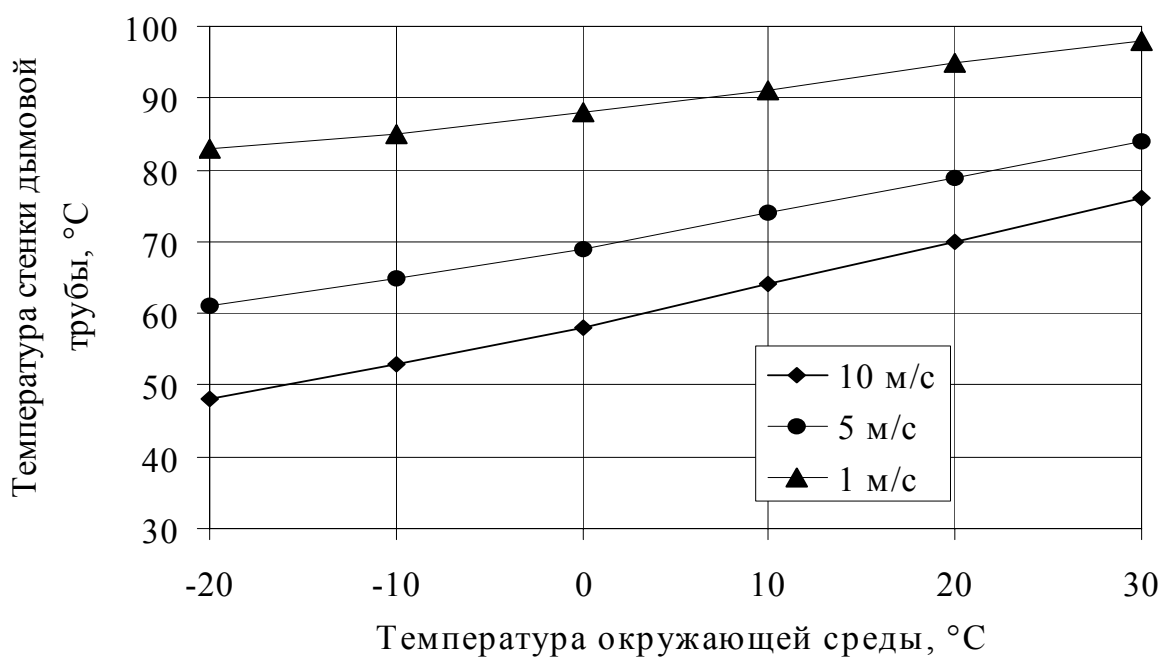


Рис. 1. Зависимость температуры стенки дымовой трубы от температуры окружающей среды и скорости ветра для температуры дыма 155 °C и расхода дыма 31 м<sup>3</sup>/с

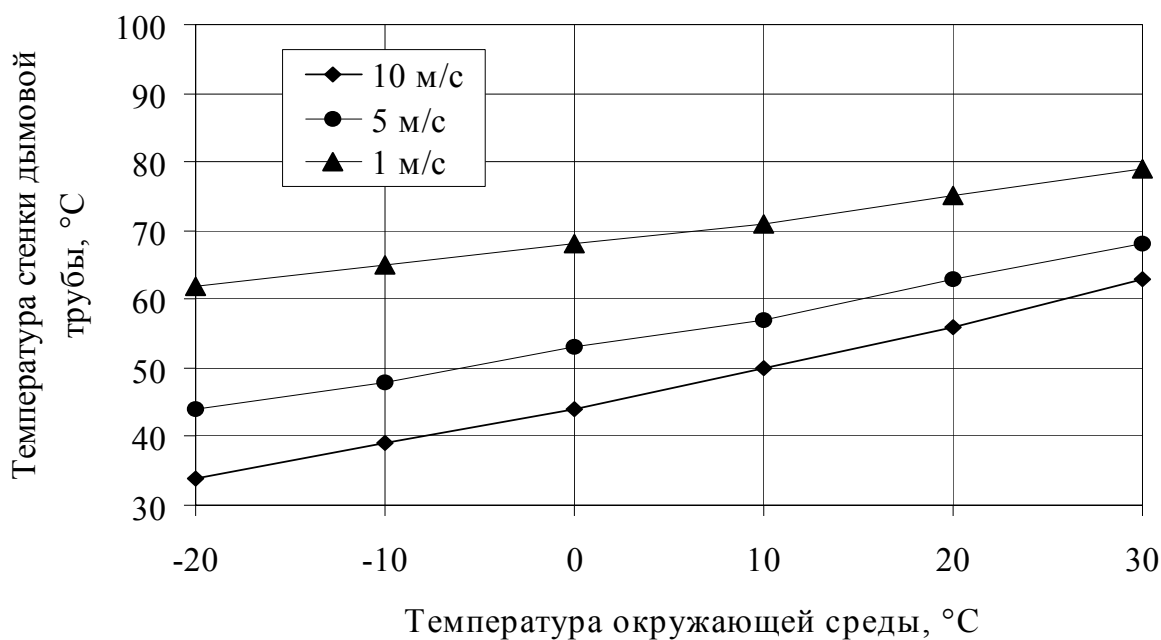


Рис. 2. Зависимость температуры стенки дымовой трубы от температуры окружающей среды и скорости ветра для температуры дыма 116 °C и расхода дыма 31 м<sup>3</sup>/с

Согласно [2] скорость коррозии металла ствола дымовой трубы зависит от разности температур газа и внутренней поверхности металлической стенки. При разности  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  скорость коррозии металла достигает  $0,1\text{ мм}$  в год, а при разности  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  скорость коррозии будет около  $2\text{ мм}$  в год. Следовательно, для уменьшения коррозии внутренней поверхности дымовой трубы наружную поверхность дымовой трубы следует покрывать слоем тепловой изоляции такого типа и такой толщины, чтобы разность температур между стенкой ствола и газом не превышала  $2 - 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Выполнены численные исследования по определению зависимости температуры внутренней поверхности дымовой трубы от толщины тепловой изоляции, наложенной снаружи. Принимали следующие исходные данные: температура дыма –  $116\text{ }^{\circ}\text{C}$ , его расход  $31\text{ м}^3/\text{с}$ , температура атмосферного воздуха –  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , скорость ветра –  $10\text{ м/с}$ . Труба снаружи покрыта тепловой изоляцией типа: минераловатные прошивные маты марки 150.

Получено (рис. 3), что при наличии слоя тепловой изоляции толщиной  $0,18 - 0,20\text{ м}$  и более разница температур между дымовыми газами и внутренней стенкой дымовой трубы меньше  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Разницу в  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  дает слой изоляции  $0,17\text{ м}$ , в  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $0,15\text{ м}$ .

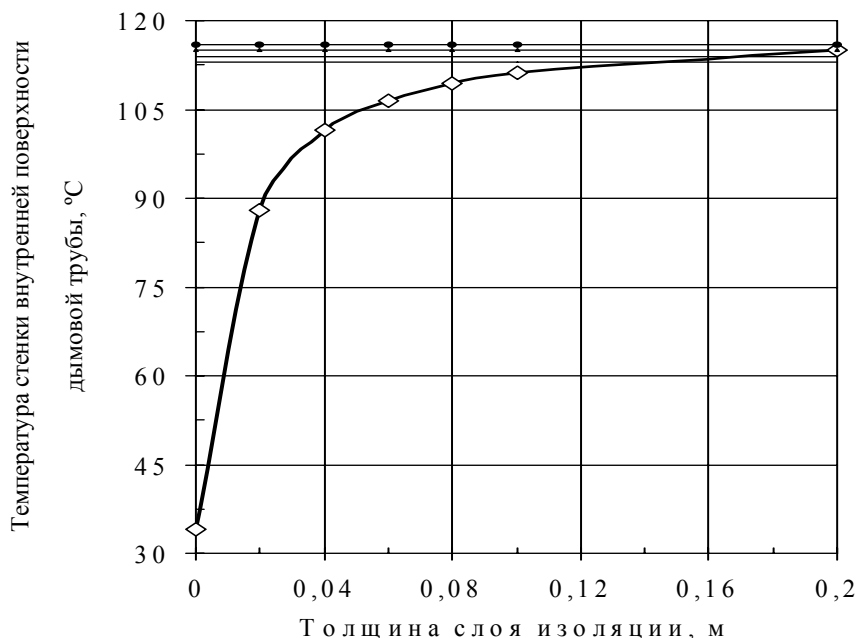


Рис. 3. Зависимость температуры внутренней поверхности дымовой трубы от толщины слоя изоляции при температуре дымовых газов  $116\text{ }^{\circ}\text{C}$

Выполнены численные исследования снижения температуры дымовых газов при их движении в дымовой трубе в случаях отсутствия теплоизоляции на наружной стороне и при наличии теплоизоляции. Исходные данные аналогичны, что и при изучении температуры стенки дымовой трубы.

Получено, что при отсутствии теплоизоляции охлаждение дымовых газов составляет 2,2 – 6,2 °С. Больше влияние оказывает изменение скорости набегающего ветра и температура окружающей среды. С увеличением расхода дымовых газов охлаждение уменьшается, несмотря на рост коэффициента теплоотдачи. На рис. 4 – 5 приведены некоторые результаты численных исследований.

С изменением температуры дыма коэффициент теплоотдачи от дыма к внутренней стенке дымовой трубы меняется незначительно. Так, при расходе дыма 31 м<sup>3</sup>/с коэффициент теплоотдачи составлял 10,1 – 10,2 Вт/(м<sup>2</sup>·град) при начальной температуре дыма 160 °С, и 10 – 10,1 Вт/(м<sup>2</sup>·град) при начальной температуре дыма 120 °С. Больше влияние оказывает изменение расхода дыма. Так, при начальной температуре дыма 120 °С коэффициент теплоотдачи составлял 10 – 10,1 Вт/(м<sup>2</sup>·град) при расходе 31 м<sup>3</sup>/с и 12,3 – 12,4 Вт/(м<sup>2</sup>·град) при расходе 40 м<sup>3</sup>/с.

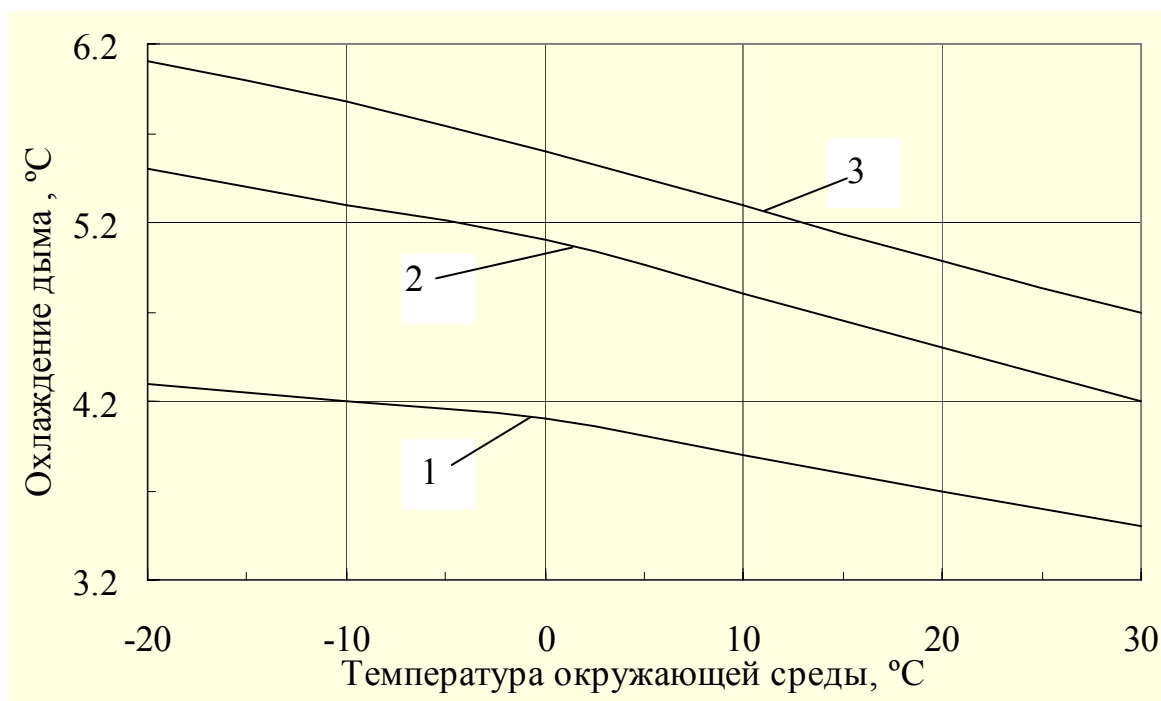


Рис. 4. Зависимость охлаждения дымовых газов от температуры окружающего воздуха и его скорости для температуры входящего дыма 160 °С, расхода 31 м<sup>3</sup>/с. Цифрами у кривых обозначена скорость ветра:  
1 – 1 м/с, 2 – 5 м/с, 3 – 10 м/с

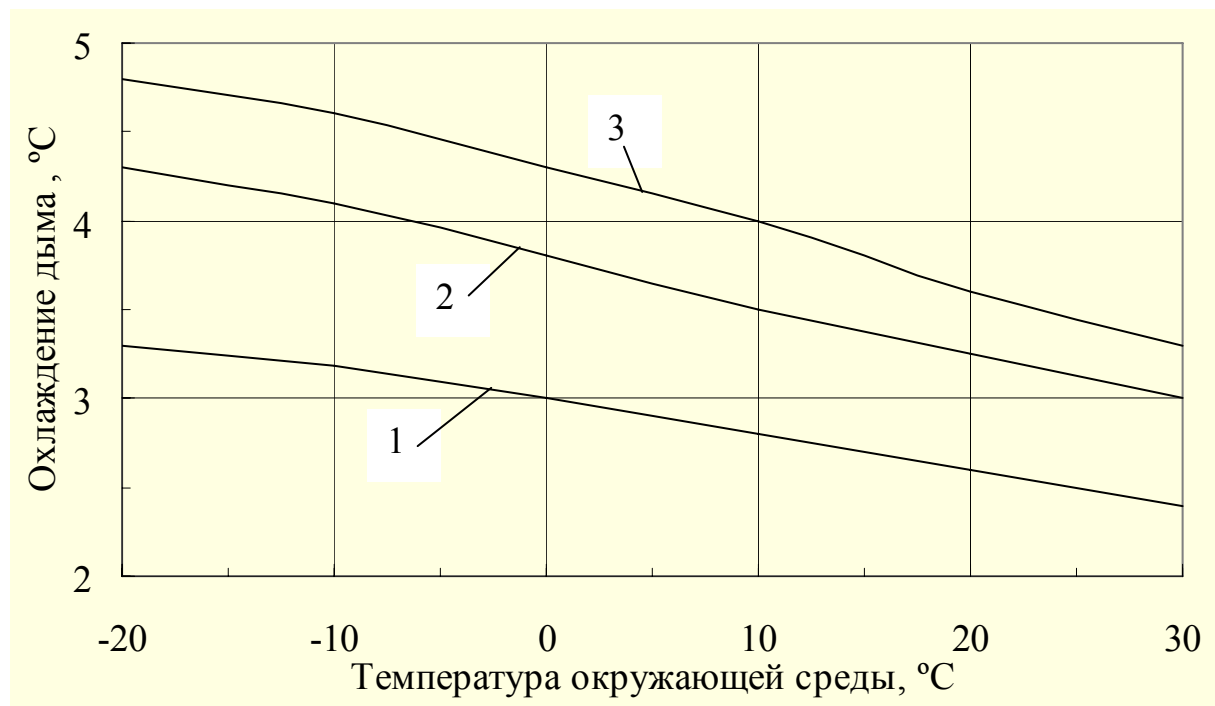


Рис. 5. Зависимость охлаждения дымовых газов от температуры окружающего воздуха и его скорости для температуры входящего дыма 120 °С, расхода 31 м<sup>3</sup>/с.

Цифрами у кривых обозначена скорость ветра:

1 – 1 м/с, 2 – 5 м/с, 3 – 10 м/с

При использовании тепловой изоляции слоем 0,15 – 0,2 м охлаждение составляет 0,2 – 0,7 °С, что согласуется с данными работы [5].

### Выводы

1. При определении минимальной температуры дымовых газов после рекуператоров необходимо учитывать их охлаждение в дымовой трубе. При этом необходимо выполнять теплотехнические расчеты, так как охлаждение будет зависеть от конструкции дымовой трубы.

2. Предложена математическая модель охлаждения газов при их движении в трубе. Установлена зависимость степени охлаждения отходящих продуктов сгорания воздухонагревателей в дымовой трубе от их переменных расходов и температуры. При отсутствии теплоизоляции в верхней части дымовой трубы охлаждение дымовых газов составляет 2,2 – 6,2 °С. Больше влияние оказывает изменение скорости набегающего ветра и температура окружающей среды. С увеличением расхода дымовых газов охлаждение уменьшается, несмотря на рост коэффициента теплоотдачи.

3. Для уменьшения скорости коррозии неизолированного участка дымовой трубы возможно использование тепловой изоляции на наружной поверхности дымовой трубы. При наличии слоя тепловой изоляции толщиной 0,18 – 0,20 м и более разница температур между дымовыми газами и внутренней стенкой дымовой трубы меньше 1 °С. Разницу в 2 °С дает слой изоляции 0,17 м, в 3 °С – 0,15 м.

#### **Список литературы**

1. Волков Э.П. Газоотводящие трубы ТЭС и АЭС / Э.П. Волков, Е.И. Гаврилов, Ф.П. Дужих. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
2. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, М.И. Михеева. – М.: Энергия, 1973.
3. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках / А.А. Жукаускас. – М.: Наука, 1982. – 472 с.
4. Расчеты нагревательных печей / [Аверин С.И., Гольдфарб Э.М., Кравцов А.Ф. и др.]. – К.: Техніка, 1967. – 540 с.
5. Жидович О.В. Охлаждение газов в дымовых трубах / О. В. Жидович, В.Н. Альшевский, Ф.П. Дужих // Теплоэнергетика. – 1977. – №3. – С. 41 – 47.

*Рукопись поступила 01.07.2009 г.*