

**Методика определения коэффициентов теплоотдачи
при расчете многослойной конструкции дымовой трубы**

Жерносек В. Л., Новик С. А.

Научный руководитель Гринев В. В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Введение

На территории СНГ возведено более сотни дымовых труб различных высот каждая, и каждая из них испытывает определенное напряженное состояние. Основные факторы влияющие на это состояние – это ветер и температура. В данной работе рассмотрены температурные воздействия.

Основным предназначением дымовых труб является вывод газов (продуктов сгорания топлива). Еще одним предназначением дымовых труб является обеспечение нормальной тяги в печи, которая находится в прямом соотношении с толщиной и высотой дымоходного канала. Температура продуктов сгорания на выходе из трубы превышает 373 К (около 100 °С), что позволяет создавать в отопительной конструкции естественную тягу – путем замещения горячих слоев воздуха холодными.

В основном данные дымовые трубы рассчитаны на температуру выходящих газов 100–200 °С, но также есть отдельные сооружения, одним из примеров которых является Нафтан Битумная 2, где температура выходящих газов достигает 1200 °С, вследствие такой температуры с течением времени происходит деформация сооружения. Расчеты аэродинамического теплового режима работы дымовых труб требуются при температурном перепаде в футеровке более 80 °С, а в ж/б оболочке более 50 °С, ввиду вышеперечисленного за основу расчета была принята дымовая труба Нафтан Битумная-2 для определения температурных воздействий, чтобы затем проанализировать влияние их на изменение температуры, и сделать выводы.

На основе рабочих чертежей трубы (рис. 1) и технических характеристик строительных конструкций дымовой трубы были проведены исследования влияния коэффициентов теплоотдачи.

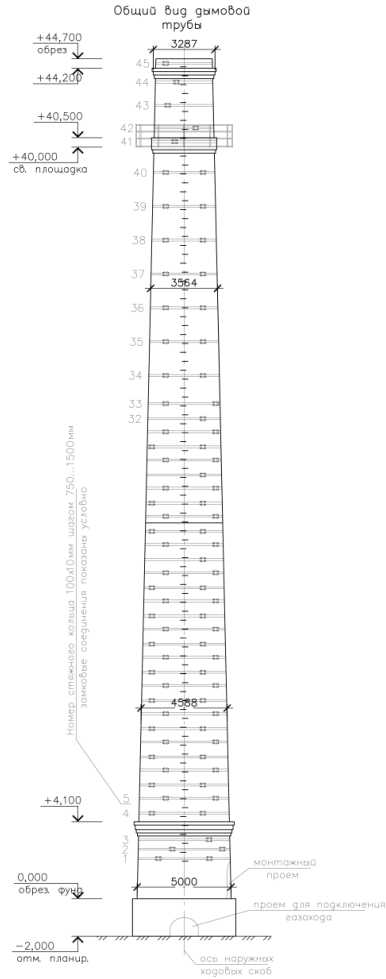


Рис. 1. Общий вид дымовой трубы

Трубу можно разделить на три характерных сечения, где несущие слои кирпича составляют 250, 380 и 510 мм. За расчетное сечение принято сечение у основания с толщиной кирпича 510 мм, так как в данном сечении наблюдаются наибольшие внутренние усилия, вызванные перепадом температуры, действием ветра и собственного веса. Характеристики сечений приведены в табл. 1. Объем уходящих газов принят $100 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таблица 1.

Параметры дымовой трубы

Отм., м	Толщина каменной кладки, мм	Диаметр d, м	Площадь сечения, $F=\pi d^2/4$	Скорость уходящего газа, $W_{г}$, м/с
0	510	3,34	8,757	11,4
9,2	380	2,164	3,676	27,2
44,7	250	2,147	3,619	27,6

Чтобы определить влияния температуры на НДС несущей кладки, необходимо знать перепад температуры. Значение температуры в плоскостях контакта слоев конструкции определяется по следующей формуле:

$$t_i = \frac{t_r - t_n}{R} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_r} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right), \quad (1)$$

где t_r - температура отводимого газа, °С;

t_n - температура наружного воздуха, °С;

R - сопротивление теплопередачи конструкции трубы, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$;

α_r - коэффициент теплоотдачи от газов к стенке, $Вт / (m^2 \cdot ^\circ C)$;

δ_i - толщина слоя конструкции, м;

λ_i - теплопроводность слоя конструкции, $Вт / (м \cdot ^\circ C)$.

Сопротивление теплопередачи R определяется по формуле

$$R = \frac{1}{\alpha_r} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{возд}}, \quad (2)$$

где $\alpha_{возд}$ - коэффициента теплоотдачи наружного воздуха.

Из формул (1) и (2) можно заметить, что для определения перепада температуры по слоям конструкции необходимо знать коэффициенты теплоотдачи α_r и $\alpha_{возд}$. В данной работе рассмотрены основные методы определения значений коэффициентов теплоотдачи и сравнение их влияния на перепад температуры в конструкции трубы.

Обзор методик определения коэффициента теплоотдачи от газа к стенке (α_g)

Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке (α_g) можно определить 3 основными методами:

С помощью номограммы РУП «Белнипиэнергопром»

Для определения этого коэффициента необходимо знать скорость газов, внутренний диаметр и температуру газов. Так как данная номограмма рассчитана на температуру до 260 градусов, интерполируя была проведена линия, представленная на рис. 2 красной линией, для температуры 1200 °С и найдено значение коэффициента теплоотдачи от газа к стенке для расчетного сечения, который составил $\alpha_g = 8.14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

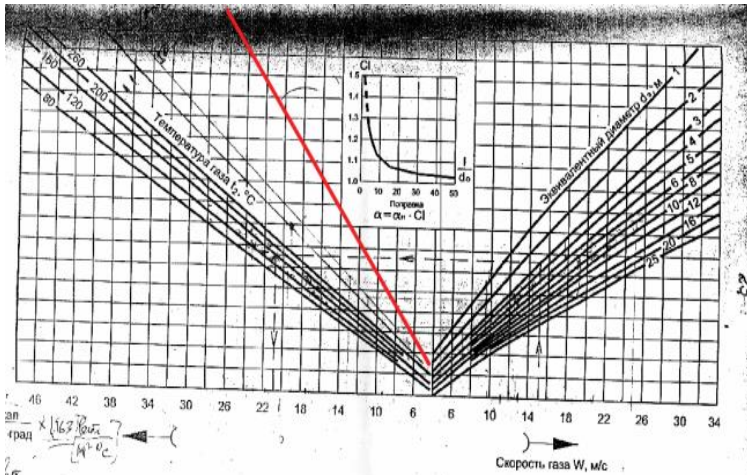


Рис. 2 Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи от газов к стенке

На основе критериальных уравнений

$$\alpha_g = \frac{Nu \cdot \lambda_g}{d} + \alpha_{ТВ}, \quad (3)$$

где для дымового газа: λ_g (Вт/м · град) – коэффициент теплопроводности дымового газа; $Nu = 0.032 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3} \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{0.054}$ – критерий Нуссельта, здесь $Re = \frac{V_g \cdot d \cdot \rho_g}{\mu_g}$ – критерий Рейнольдса, V_g (м/с) – скорость; ρ_g (кг/м³) – плотность; L (м) – длина расчетного участка, принимается равной 10м; μ_g (Н · с/м²) – коэффициент

динамической вязкости; $Pr = \frac{\mu_r \cdot c_p}{\lambda_r}$ – критерий Прандтля; c_p (Дж/кг · град) – изобарная теплоемкость; d (м) – внутренний диаметр газоотводящего ствола; $\alpha_{ТВ}$ (Вт/м² · град) – коэффициент тепловосприятости внутренней стенки футеровки, контактирующей с отводящими газами, принимаемый равным 8 Вт/м² · град.

Согласно вышеописанным условиям был получен коэффициент теплоотдачи от газа к стенке для расчетного сечения с помощью Mathcad, и который составил $\alpha_r = 22,85$ Вт/(м²·°C).

С помощью упрощенной формулы согласно В. Г. Сатьянову

$$\alpha_r = \left(8 + \frac{160}{(t_r + 273)^{0.563}} \cdot \frac{W^{0.8}}{d^{1.746} \cdot L^{0.054}} \right), \quad (4)$$

где W (м³/с) – объем отводимого газа.

В результате чего было получено с помощью Mathcad, что $\alpha_r = 19,28$ Вт/(м²·°C).

Обзор методик определения коэффициента теплоотдачи наружного воздуха ($\alpha_{возд}$)

Для получения коэффициента теплоотдачи наружного воздуха ($\alpha_{возд}$) можно воспользоваться двумя основными способами:

С помощью нормативного документа[3]

Согласно ТКП 45-2.04-43-2006 $\alpha_{возд} = 23$ Вт/(м²·°C).

В зависимости от расстояния между уровнем земли и рассматриваемым сечением

Согласно формуле (1):

$$\alpha_{возд} = 23 \cdot Z^{0.062}, \quad (5)$$

где Z (м) – расстояние от поверхности земли до рассматриваемого сечения трубы.

Для расчетного сечения при $Z = 9,2$ м – $\alpha_{возд} = 26,4$ Вт/(м²·°C).

Определение влияние коэффициентов теплоотдачи на несущую кладку дымовой трубы

Для определения влияния коэффициентов на перепад температуры в кладке были приняты минимальные и максимальные значения коэффициентов полученных ранее:

1) $\alpha_c = 8,14$ Вт/(м²·°C) и $\alpha_{возд} = 23$ Вт/(м²·°C).

2) $\alpha_c = 22,85$ Вт/(м²·°C) и $\alpha_{возд} = 26,4$ Вт/(м²·°C).

Дальнейшие вычисления были проведены с помощью Excel и сведены в таблицы 3 и 4.

Пункты 1–3 и 5–8 табл. 3, 4 получены на основании характеристик трубы. Пункты 4 и 13 получены на основании вышеприведенных расчетов. Пункты 9–12 – это теплопроводность слоя конструкции. Пункты 14, 15, 17–23 получены согласно формуле (1).

Таблица 3.

Расчет температур на слоях конструкции трубы
для первого варианта

№ п/п	Параметры, обозначения	Размерность	Величины
1	Температура дымовых газов, t_r	°С	1200
2	Температура наружного воздуха, $t_{н.в.}$	°С	-25
3	Скорость газов, W_r	м/с	11,4
4	Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке, α_r	Вт/м ² °С	8,14
5	Толщина футеровки из шамотного огнеупорного кирпича, $\delta_{фк}$	м	0,12
6	Толщина диатомового кирпича, $\delta_{д}$	м	0,12
7	Толщина мин. ваты	м	0,08
8	Толщина кирпичной стенки, $\delta_{к}$	м	0,51
9	К-т теплопроводности шамотного огнеупорного кирпича, $\lambda_{фк}$	Вт/м°С	0,84
10	То же диатомового кирпича	Вт/м°С	0,2
11	То же мин ваты, $\lambda_{кгр}$	Вт/м°С	0,06
12	То же кирпичной стенки, $\lambda_{об}$	Вт/м°С	0,81
13	К-т теплоотдачи $\alpha_{возд}$ от наружной поверхности несущего слоя	Вт/м ² °С	23
14	Разность температур «газ-стенка», Δt_r	°С	52,4
15	Температура внутренней поверхности футеровки, t_1	°С	1147,6
16	Тепловой поток через ограждающие конструкции, $q = \alpha_r \cdot \Delta t_r$	Вт/м ²	426,51
17	Температура внешней поверхности футеровки, t_2	°С	1086,67
18	Температура внутренней поверхности диатомового кирпича, t_2	°С	1086,67
19	Температура внешней поверхности диатомового кирпича, t_3	°С	830,77
20	Температура внутренней поверхности мин. ваты, t_3	°С	830,77
21	Температура внешней поверхности мин. ваты, t_4	°С	262,09
22	Температура внутренней поверхности кирпичной стен, t_4	°С	262,09
23	Температура внешней поверхности кирпичной стенки, t_5	°С	-6,46
24	Перепад температур в футеровке, Δt_f	°С	60,93
25	Перепад температур в несущей кладке, Δt_k	°С	268,54

Таблица 4.

Расчет температур на слоях конструкции трубы
для второго варианта

№ п/п	Параметры, обозначения	Размерность	Величины
1	Температура дымовых газов, t_r	°С	1200
2	Температура наружного воздуха, $t_{н.в.}$	°С	-25
3	Скорость газов, $Wг$	м/с	11,4
4	Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке, α_r	Вт/м ² °С	22,85
5	Толщина футеровки из шамотного огнеупорного кирпича, $\delta_{кк}$	м	0,12
6	Толщина диатомового кирпича, $\delta_{д}$	м	0,12
7	Толщина мин. ваты	м	0,08
8	Толщина кирпичной стенки, $\delta_{к}$	м	0,51
9	К-т теплопроводности шамотного огнеупорного кирпича, $\lambda_{кк}$	Вт/м°С	0,84
10	То же диатомового кирпича	Вт/м°С	0,2
11	То же мин ваты, $\lambda_{кг}$	Вт/м°С	0,06
12	То же кирпичной стенки, $\lambda_{об}$	Вт/м°С	0,81
13	К-т теплоотдачи $\alpha_{возд}$ от наружной поверхности несущего слоя	Вт/м ² °С	26,4
14	Разность температур «газ-стенка», $\Delta tг$	°С	19,23
15	Температура внутренней поверхности футеровки, t_1	°С	1180,77
16	Тепловой поток через ограждающие конструкции, $q = \alphaг \cdot \Delta tг$	Вт/м ²	439,47
17	Температура внешней поверхности футеровки, t_2	°С	1117,99
18	Температура внутренней поверхности диатомового кирпича, t_2	°С	1117,99
19	Температура внешней поверхности диатомового кирпича, t_3	°С	854,31
20	Температура внутренней поверхности мин. ваты, t_3	°С	854,31
21	Температура внешней поверхности мин. ваты, t_4	°С	268,35
22	Температура внутренней поверхности кирпичной стен, t_4	°С	268,35
23	Температура внешней поверхности кирпичной стенки, t_5	°С	-8,35
24	Перепад температур в футеровке, $\Delta tф$	°С	62,78
25	Перепад температур в несущей кладке, $\Delta tк$	°С	276,7

Конструкция трубы состоит из шамотного огнеупорного кирпича, диатомового кирпича, минеральной ваты и обычного кирпича. Расчетное сечение трубы расположено в основании, где толщина несущей кладки составляет 510 мм. По данным расчета было построено температурное поле для конструкции трубы на рис. 3.

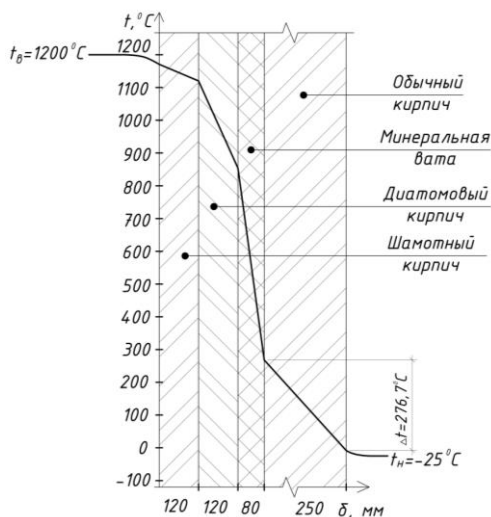


Рис. 3. Температурное поле для конструкции трубы согласно табл. 4

Результаты анализа полученных перепадов п. 25 табл. 3 и п. 25 табл. 4 показал, что перепад температуры составил для первого варианта $\Delta t_{\text{к}} = 268,54^\circ\text{C}$, а для второго варианта $\Delta t_{\text{к}} = 276,7^\circ\text{C}$. Соответственно можно сделать вывод, что во втором варианте менее благоприятные условия для НДС кладки, так как температурные напряжения напрямую зависят от перепада температуры.

Таким образом, при расчете труб на температурные воздействия для определения коэффициента теплоотдачи от газов к стенке (α_2) рациональнее использовать критериальные уравнения, а для получения коэффициента теплоотдачи воздуха $\alpha_{\text{возд}}$ формулой (5). Так как при их использовании перепад температуры принимает максимальное значение.

Согласно полученным результатам можно отметить, что с увеличением значений коэффициентов теплоотдачи, увеличивается перепад температуры в несущем слое.

Так же необходимо отметить, что коэффициент теплоотдачи от газов к стенке (α_2) согласно формуле (4) можно определить на основе параметров, непосредственно определяемых при экспертизе.

Выводы

1. Оптимизирована методика по определению коэффициента теплоотдачи.
2. Проработан алгоритм расчета в табличной форме по определению температуры в любой точке сечения трубы.
3. Выполнен расчет в программном комплексе Mathcad для определения коэффициентов теплоотдачи от газа к стенке.
4. Выполнен сравнительный анализ полученных данных.
5. Полученные результаты дают возможность определить перепады температур в сечениях трубы, используя различные способы получения коэффициентов теплоотдачи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сатьянов, В.Г. «Методика расчета нагрузок, прочности и ресурса стволов дымовых и вентиляционных промышленных труб».
2. Михеев, М.А., Михеева, И.М. «Основы теплопередачи».
3. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43-2006.
4. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией от газа к стенке, разработанная РУП «Белнипиэнергопром».
5. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43-2006.
6. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1967. – 474 с.

УДК 624

К вопросу исторического зарождения, развития и освоения подземного пространства

Жолнерович О. Н.

Научный руководитель Ловыгин А. Н.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Самую яркую характеристику архитектуры первобытного человека, проживавшего на равнинной местности, дает изучение