

## РАСЧЕТ ОСЕВЫХ ТЕПЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ ГАЗОВОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

*к.т.н., доц. Ткачева В.В.*

*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»*

*Светлой памяти  
моего учителя  
д.т.н., профессора  
Эдуарда Николаевича Кваши.*

**1. Введение.** Важной задачей проектирования трубчатых газовых нагревателей является обеспечение их безотказности. Безотказность – один из единичных критериев надежности, который позволяет сохранять работоспособность системы на протяжении некоторого времени ее работы [1]. В процессе эксплуатации трубчатая часть нагревателя подвергается значительным тепловым воздействиям, которые приводят к возникновению линейного расширения металла. Если этому расширению препятствуют неподвижно закрепленные концы стержня, то в трубчатой части нагревателя будут возникать сжимающие тепловые напряжения. Поэтому проектирование и монтаж нагревателей необходимо выполнять так, чтобы труба могла свободно двигаться в пределах величины расчетного расширения. От этих условий зависит работоспособность нагревателя.

**2. Постановка задачи.** Известен метод расчета тепловых удлинений инфракрасного трубчатого газового обогревателя [2]. Предлагается на основе этого подхода и усовершенствованной модели трубчатого газового нагревателя (ТГН) [3] получить математическую модель для расчета осевых тепловых напряжений.

**3. Изложение основного материала исследований.** Схема расположения трубчатого газового нагревателя в проектируемом помещении представлена на рис.1.

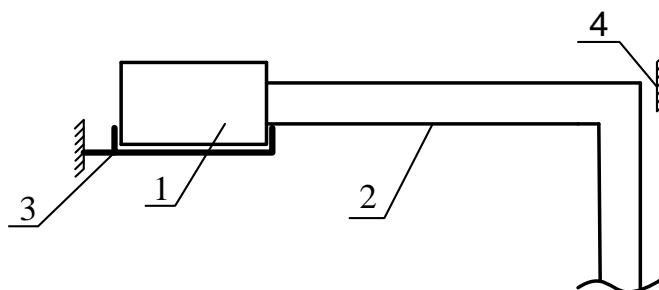


Рис. 1. Схема расположения линейной части трубчатого газового нагревателя в проектируемом помещении  
1 – газогорелочный блок; 2 – линейная часть трубчатого нагревателя;  
3 – жесткое закрепление нагревателя к стене; 4 – неподвижная опора

Математическую модель теплового и гидравлического режима можно записать, опираясь на результаты [4] с некоторыми поправками, в виде

$$M = \rho w F = \text{const} \quad (1)$$

$$p = \rho R T \quad (2)$$

$$dp = -\Lambda \cdot dx/D \cdot \rho \frac{w^2}{2} + dh \cdot (\rho_a - \rho) \cdot g \quad (3)$$

$$dQ_{IK} = \pi D dx \alpha_1 (T - T_{wi}) \quad (4)$$

$$dQ_{1Л} = \pi D dx c_o \varepsilon (T^4 - T_{wi}^4) 10^{(-8)} \quad (5)$$

$$dQ_2 = \pi D dx \frac{\lambda}{\delta} (T_{wi} - T_{wo}) \quad (6)$$

$$dQ_3 = \pi D dx c_o \varepsilon_w (T_{wo}^4 - T_o^4) 10^{(-8)} \quad (7)$$

$$dQ_4 = \pi D dx \alpha_2 (T_{wo} - T_o) \quad (8)$$

$$dQ_1 = dQ_{IK} + dQ_{1Л} \quad (9)$$

$$d(\rho w F c_p T) = -dQ_1 \quad (10)$$

$$dQ_1 = dQ_2 \quad (11)$$

$$dQ_2 = dQ_3 + dQ_4 \quad (12)$$

Имеем зависимость  $h=h(x)$  – известная функция.

Тогда  $dh = h'(x)dx$ ,

где  $h'(x)$  - известная производная.

Приведенная математическая модель отличается от математических моделей, которые раньше использовались для моделирования инфракрасных трубчатых обогревателей или трубчатых нагревателей, наличием гидростатической составляющей  $dh \cdot (\rho_a - \rho) \cdot g$ , где  $\rho_a$  – плотность воздуха в окружающей среде.

В уравнениях (1)-(12) приняты обозначения:  $w$  – скорость;  $p$  – давление;  $\rho$  - плотность;  $T$  – температура газовой смеси;  $T_{wi}$  - температура внутренней стенки трубы;  $T_{wo}$  - температура наружной стенки трубы;  $x$  - линейная координата;  $dQ_1$  - тепловой поток, передаваемый от газовой смеси к трубе;  $dQ_2$  - тепловой поток, передаваемый теплопроводностью через стенку трубы;  $dQ_3$  - тепловой поток, передаваемый излучением от стенки трубы в окружающее пространство,  $dQ_4$  - тепловой поток, передаваемый конвекцией от стенки трубы в окружающее пространство.

При работе трубчатая часть нагревателя значительно нагревается (темпе-

ратура наружной поверхности трубы может достигать 450-700°С).

При осесимметричном изменении температур на поверхностях линейного трубчатого нагревателя происходит изменение линейных размеров, при этом нагреватель не меняет своей формы.

В таблице 1 представлены результаты температурных удлинений линейной части трубчатого нагревателя для двух режимов: при подаче приточного воздуха  $V=500 \text{ м}^3/\text{час}$  и  $V=250 \text{ м}^3/\text{час}$ .

Табл. 1.

Результаты температурных удлинений  
линейной части трубчатого нагревателя для двух режимов

L, м	Режим 1 $V=500 \text{ м}^3/\text{час}$			Режим 2 $V=250 \text{ м}^3/\text{час}$		
	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta l, \text{ м}$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta l, \text{ м}$
1	380.67.	286.68	0.0019	711.36	541.39	0.0049
2	533.22	426.048	0.0089	825.76	672.87	0.016
3	499.54	399.24	0.015	660.7	530.30	0.025
4	470.33	376.00	0.211	560.06	449.08	0.033
5	444.07	350.88	0.027	490.03	392.88	0.040
6	420.34	332.26	0.032	436.30	345.74	0.045
7	399.07	315.58	0.037	392.72	311.37	0.05
8	379.89	300.52	0.042	357.02	283.27	0.055
9	362.37	286.82	0.047	326.98	259.65	0.059
10	346.34	274.26	0.051	301.23	239.41	0.063
11	331.59	262.71	0.056	278.80	221.80	0.066
12	317.94	252.02	0.060	259.02	206.28	0.070

**Примечание:** В таблице  $\Delta l$  - температурное удлинение линейной части нагревателя, м.

Далее рассмотрим несколько вариантов расчета осевых тепловых напряжений, вызванных удлинением линейной части нагревателя, решение которых получено на основании математической теории упругости.

**Задача 1.** Определим тепловые напряжения, возникающие в случае, когда нагреватель установлен между неподвижными опорами (рис.2).

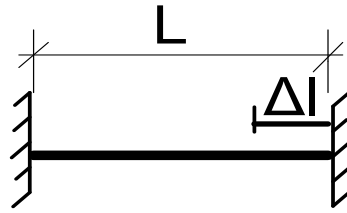


Рис.2.

Относительное удлинение  $\varepsilon$  равно продольной температурной деформации. Тогда, уравнение принимает вид

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L} = \alpha(t - t_0)$$

или 
$$\Delta l = L \cdot \alpha \cdot (t - t_0), \quad (13)$$

где  $\alpha$  - коэффициент линейного расширения (для стали  $\alpha = 1.3 \cdot 10^{-5} 1/^\circ C$ ).

Для трубчатого газового нагревателя температура трубчатой части меняется вдоль оси нагревателя. Поэтому формулу (13) нужно использовать для бесконечно малой  $dl$ , т.е. итоговое температурное удлинение можно рассчитать в виде:

$$\Delta l_T = \int_0^l \alpha \cdot (t_{(x)} - t_0) dx, \quad (14)$$

где температура  $t_{(x)}$  - температура стенки трубчатого нагревателя, рассчитывается по математической модели (1) – (12);  $t_0$  - начальная температура стенки трубчатого нагревателя.

Согласно закону Гука, тепловые напряжения, вызванные удлинением линейной части нагревателя вследствие нагрева, определяются из уравнения:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

$$\sigma = \alpha(t - t_0) E,$$

где  $\varepsilon$  - продольная температурная деформация;  $L$  – длина нагревателя, м;

$E$  - модуль Юнга (для стали  $E = 2 \cdot 10^{11} Па$ ).

Как видим, величина тепловых напряжений непосредственно зависит только от модуля упругости  $E$ , коэффициента линейного расширения  $\alpha$  и от перепада температур внутренней и наружной поверхности линейной части нагревателя.

**Задача 2.** Определим тепловые напряжения, в случае, когда между нагревателем и неподвижными опорами имеется свободный зазор (рис.3), где  $\Delta l$  - температурное удлинение;  $\Delta X$  – свободное расстояние конца нагревателя от неподвижной опоры;  $\Delta l_{расч}$  - расчетное температурное удлинение.

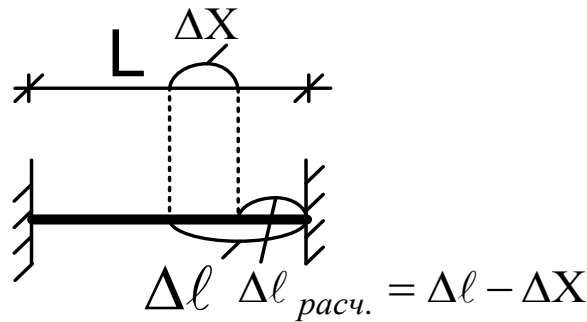


Рис.3.

В этом случае тепловые напряжения будут определяться так:

$$\sigma_{расч.} = \varepsilon_{расч.} \cdot E$$

Расчетные температурные удлинения могут быть определены таким образом:

$$\Delta l_{расч.} = \Delta l_T - \Delta X,$$

$$\Delta l_T = \varepsilon_T \cdot L$$

После преобразований температурные деформации можно вычислить:

$$\varepsilon_{расч.} = \frac{\Delta l_{расч.}}{L} = \frac{\Delta l_T - \Delta X}{L} = \frac{\varepsilon_T \cdot L - \Delta X}{L} = \varepsilon_T - \frac{\Delta X}{L} \quad (15)$$

В формуле (15)  $\Delta l_T$  можно рассматривать как удлинение на малом участке  $dx$  или как результат интегрирования по формуле (14).

График зависимости тепловых напряжений от температурных удлинений представлен на рис.4, где показаны тепловые напряжения и удлинения из условий решения задачи 1 и задачи 2.

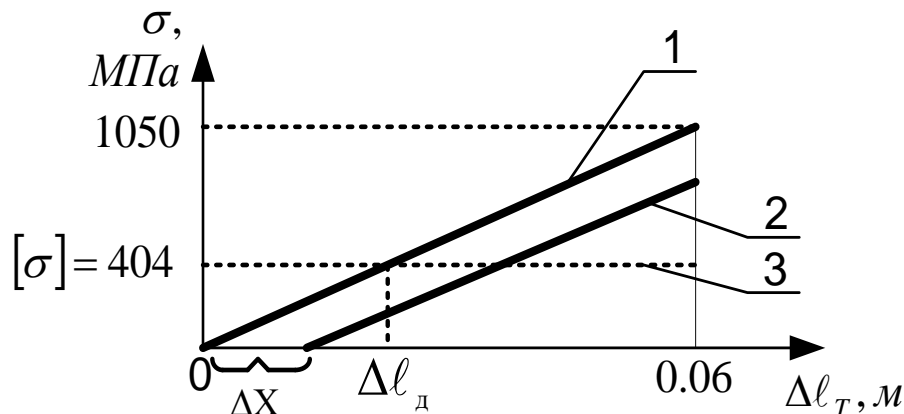


Рис. 4. График зависимости тепловых напряжений от температурных удлинений

1 – зависимость для условий задачи 1; 2 – зависимость для условий задачи 2; 3 – допустимое напряжение

**Задача 3.** Условие такое же, как и в задаче 1, но только изменился температурный режим за счет уменьшения расхода приточного воздуха ( $V=250$

м<sup>3</sup>/час).

Сопоставление результатов расчета температурных удлинений для двух режимов ( $V=500 \text{ м}^3/\text{час}$  и  $V=250 \text{ м}^3/\text{час}$ ) приведено в табл.1. Видно, что изменение расхода приточного воздуха влияет на температурные удлинения.

**4. Оценка прочности линейной части нагревателя.** Предел прочности – это максимальное напряжение, возникающее в теле до разрушения. Расчет на прочность высокотемпературных элементов проводят по временному сопротивлению  $\sigma_b$  при рабочей температуре. Номинально допускаемое напряжение  $[\sigma]$  определяют с учетом запаса:

$$[\sigma] = \left\{ \frac{\sigma_s}{n_s} \right\}$$

где  $n_s$  - коэффициент запаса (для пластичных материалов  $n_s = 2.6$ ).

**Пример.** Линейная часть трубчатого нагревателя может быть изготовлена из жаропрочной нержавеющей стали 2Х13. При максимальной температуре  $713^\circ\text{C}$  ее механические свойства равны  $\sigma_s = 490 \text{ МПа}$ . Номинально допускаемые тепловые напряжения составляют  $[\sigma] = 404 \text{ МПа}$ . Из графика рис.4 можно наглядно видеть при каких температурных удлинениях в задачах 1 и 2 не выполняется условие  $\sigma_{\max} \leq [\sigma]$ .

**5. Выводы.** Разработана методика расчета осевых тепловых напряжений в трубчатых газовых нагревателях, расположенных между неподвижными опорами со свободным зазором. В основе методики содержится расчет температурных удлинений нагревателя на основании математической модели теплового и гидравлического режима нагревателя и интегрирование температурных удлинений по длине нагревателя с учетом температуры его поверхности.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Надежность систем энергетики. Терминология: Сб. рекомендуемых терминов. – М. : Наука, 1980. – Вып. 95. – 44 с.
2. Расчет температурных удлинений инфракрасного трубчатого газового обогревателя / В. Ф. Иродов, В. В. Ткачева, Л. В. Солод // Theoretical Foundations of Civil Engineering: Polish – Ukrainian Transactions. Vol.19. – Warsaw: Warsaw University of Technology, 2011.-Р. 381–386
3. Дудкин К.В. Трубчатые газовые нагреватели для теплоснабжения в сельской местности / Дудкин К. В., Ткачева В. В., Иродов В. Ф. // ISBN: 978-3-659-52278-9. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.-156 с.
4. Иродов В. Ф. Математическое моделирование элементарного участка системы воздушно-лучистого отопления / В. Ф. Иродов, Л. В. Солод, А. В. Кобыща // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.- Дніпропетровськ: ПДАБтаА, 2001. – № 4. С. 41–46.