

**Яровой С.Н.***Харьковский национальный университет строительства и архитектуры***ДОЛГОВЕЧНОСТЬ И ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЫМОВЫХ ТРУБ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО И КОРРОЗИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

В настоящее время на промышленных предприятиях Украины эксплуатируются более трех тысяч дымовых труб (рис. 1). Многие из находящихся в эксплуатации дымовых труб работают на протяжении 30-50 лет и более.



*Рис. 1. Металлические дымовые трубы высотой 22.00м компрессорной станции «Заднепровская» магистрального газопровода*

За время эксплуатации происходит накопление дефектов и повреждений, которые образуются, в основном, из-за нестационарного ветрового воздействия, агрессивных компонент рабочей среды, высокотемпературных и механических воздействий [8, 10]. При образовании существенных дефектов и повреждений происходит интенсификация разрушения несущего ствола дымовой трубы. Выход из эксплуатации дымовых труб может привести к тяжелым последствиям для производства и рабочего персонала, жизнеобеспечения населения и территории [2, 9 [3]].

В настоящее время остро стоит вопрос оценки остаточного ресурса и долговечности высотных инженерных сооружений специального назначения таких как, металлические дымовые трубы. Цель данной статьи – оценка остаточного ресурса металлических дымовых труб с учетом различных воздействий за длительный срок эксплуатации и прогнозирование дальнейшей эксплуатации металлических труб.

За весь жизненный цикл металлические дымовые трубы подвергаются совместному воздействию высоких температур и коррозионного износа (рис. 2). Совместное воздействие высоких температур и коррозии существенно снижает долговечность и остаточный ресурс дымовых труб.



а)



б)

*Рис. 2. Коррозионные повреждения дымовой трубы: а) – коррозионный износ ствола до 20% сечения; б) сквозная коррозия днища трубы.*

Для рассмотрения воздействия на дымовую трубу сжимающей силы  $Q$  и коррозии выделим участок дымовой трубы и рассмотрим его работу (рис.3).

Рассмотрим случай, когда дымовая труба испытывает одноосное напряжен-

ное состояние и коррозионный износ происходит на внутренней поверхности трубы.

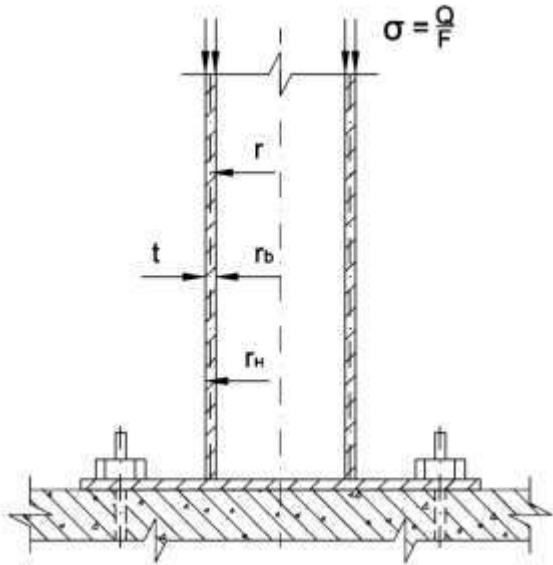


Рис. 3. Поперечный разрез дымовой трубы под действием сжимающей силы Q.

В процессе коррозионного износа трубы нормальные напряжения будут изменяться по формуле [4, 5]:

$$\sigma(\tau) = \frac{Q}{\pi[r_n^2 - (r_g + S_g(\tau))^2]}, \quad (1)$$

где  $S_g(\tau)$  – приращение внутреннего радиуса трубы из-за коррозии поверхности.

Из этой формулы следует, что

$$r_g + S_g(\tau) = \sqrt{r_n^2 - \frac{\sigma_0 \cdot (r_n^2 - r_g^2)}{\sigma(\tau)}}, \quad (2)$$

Дифференцируя уравнение (2) по времени получим

$$\frac{d\sigma}{d\tau} = \frac{2 \cdot \sigma^2 \cdot (r_g - t_g(\tau) d/d\tau [r_g + S(\tau)])}{(r_n^2 - r_g^2) \cdot \sigma_0}. \quad (3)$$

Скорость изменения внутреннего радиуса  $d[r_g + S_g(\tau)]/dt$  должна быть равной скорости коррозии  $v_0$ , определяемой в соответствии с формулой (3) при упругих деформациях:

$$d[r_g + S_g(\tau)]/d\tau = v_0(1 + k_\sigma \sigma_i) \quad (4)$$

где  $v_0$  – скорость коррозии ненапряженного металла;  $k_\sigma$  – механохимический параметр;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

Механохимический параметр  $k_\sigma$  можно определить расчетным путем:

$k_\sigma \approx V/3RT$ , где  $V$  – мольный объем стали;  $R$  и  $T$  – универсальная газовая и абсолютная температура.

Рассматривая совместно выражения

(2) и (4), получим

$$\frac{d\sigma}{d\tau} = \frac{2 \cdot v_0 \cdot \sigma_i^2 \sqrt{r_n^2 - \frac{\sigma_0(r_n^2 - r_g^2)}{\sigma_i}} \cdot (1 + k_\sigma \cdot \sigma_i)}{(r_n^2 - r_g^2) \cdot \sigma_0} \quad (5)$$

где  $\sigma_0$  – напряжения в дымовой трубе до начала коррозионного процесса. Здесь принято, что  $\sigma_i = \sigma$ .

Уравнение (5) определяет динамику изменения интенсивности напряжений  $\sigma_i(t)$  в процессе эксплуатации при коррозионных повреждениях трубы.

За предельное состояние трубы примем условие текучести Мизеса –  $\sigma_i = \sigma_T$ , (здесь  $\sigma_T$  – предел текучести стали).

Долговечность  $\tau_T$  (время до наступления текучести металла дымовой трубы) получаем интегрированием уравнения (5) в пределах от 0 до  $\tau_T$  и от  $\sigma_0 = \sigma_T$ :

$$\tau_T = \frac{\sigma_0 \cdot (r_n^2 - r_g^2)}{2v_0} \times \quad (6)$$

$$\times \int_{\sigma_0}^{\sigma_T} \frac{d\sigma_i}{\sigma_i^2 (1 + k_\sigma \cdot \sigma_i) \cdot \sqrt{r_n^2 - \frac{\sigma_0(r_n^2 - r_g^2)}{\sigma_i}}}$$

На основании уравнения (6) и анализа численных расчетов  $\tau_T$  установлено, что долговечность труб при коррозионном повреждении труб можно рассчитывать по формуле:

$$\tau_T = \frac{t_0}{v_0} (1 - K_{HT}) \cdot \left( 1 + \frac{V \cdot \sigma}{3 \cdot R \cdot T} \sqrt{K_{HT} \cdot T} \right) \quad (7)$$

где  $t_0$  – начальная толщина трубы;  $K_{HT} = \sigma_0/\sigma_T$  – коэффициент использования несущей способности по  $\sigma_T$ .

Величина обратная коэффициенту  $K_{HT}$  представляет собой коэффициент запаса прочности по пределу текучести  $n_T$  и который равен  $n_T = \sigma_T/\sigma_0$ . Исходя из этой формулы, можно констатировать, что повышение уровня напряженности металла приводит к снижению ресурса дымовых труб. То есть, при выборе марок сталей для дымовых труб необходимо учитывать, что повышение исходных прочностных свойств не всегда может привести к желанным результатам. Очевидно, что снижение  $K_{HT}$  увеличивает долговечность  $\tau_T$ .

При повреждении футеровки металлический ствол дымовой трубы может оказаться под воздействием высоких температур. Проанализируем работу металлических труб при воздействии высоких температур.

С повышением температуры механические свойства металла такие как, модуль упругости, пределы прочности, пропорциональности и текучести убывают [3]. При этом пластичность, как правило, увеличивается, но при некоторых температурах в зависимости от состава стали и понижаться.

Для металлических дымовых труб при нормальной температуре статическая прочность не зависит от продолжительности времени ее приложения. Но при высоких температурах, механические характеристики металла дымовых труб определяют как, при кратковременных так и длительных испытаниях. Прочность металла при продолжительных испытаниях и при воздействии высоких температур определяет его длительную прочность. Напряжение, при котором образец разрушается не ранее заданного времени, называют пределом длительной прочности  $\sigma_{дл}$ . Предел длительной прочности ниже предела прочности при кратковременных испытаниях.

На практике, для определения механических свойств образца металла при продолжительной работе и при воздействии высоких температур, его нагревают в электропечи и нагружают, фиксируя время до разрушения  $t_r$ . Время разрушения образца уменьшается с ростом напряжения в нем.

Зависимость предела длительной прочности  $\sigma_{дл}$  от времени при постоянной температуре  $t^{\circ}C$  описывается кривой длительной прочности. В двойных логарифмических координатах эта зависимость в определенных пределах имеет вид прямой линии.

Размеры нагруженных при высокой температуре элементов трубы непрерывно меняются, то есть происходит ползучесть. Зависимость остаточной деформации от времени испытаний при постоянном напряжении и постоянной температуре является кривой ползучести. При испытании

на ползучесть к нагретому образцу прикладывают постоянную нагрузку и через определенный промежуток времени измеряют удлинение образца.

Остаточная деформация вначале быстро нарастает (неустановившаяся ползучесть), в дальнейшем на протяжении основного времени остается постоянной (установившаяся ползучесть), и в конце перед разрушением образца скорость ползучести быстро нарастает. Увеличение температуры и напряжения убыстряет развитие ползучести.

При воздействии на металлические дымовые трубы высоких температур может происходить интенсивное окисление ствола трубы. В неравномерно нагретых дымовых трубах ползучесть с течением времени приводит к перераспределению напряжений: в более холодных зонах напряжение увеличивается, в более горячих – уменьшается.

Обычные малоуглеродистые стали для изготовления металлических дымовых труб при значительных напряжениях в стволе, применяют для температур не более  $300 - 400^{\circ}C$ . Низколегированные жаропрочные стали, на основе никеля и других тугоплавких металлов, применяют при температурах до  $700 - 800^{\circ}C$ . Для работы дымовых труб при более высоких температурах используют металлокерамические и керамические материалы.

Оценка влияния высоких температур на прочность металла дымовых труб определяется температурным коэффициентом снижения прочности, который равен:

$$\varphi_{\sigma}^T = \frac{\sigma_B^{(T)}}{\sigma_B} \quad (8)$$

где  $\sigma_B^{(T)}$  и  $\sigma_B^{20}$  - предел прочности стали при температуре  $T$  и  $+20^{\circ}C$ .

Температурный коэффициент снижения прочности оцениваем на основании изменения допустимых напряжений от температуры для малоуглеродистых и низколегированных сталей, и определяем по формуле:

$$\varphi_{\sigma}^T = 1 - 0,75 \left( \frac{T}{500^{\circ}C} \right)^{2,3} \quad (9)$$

Анализируя формулу можно сделать

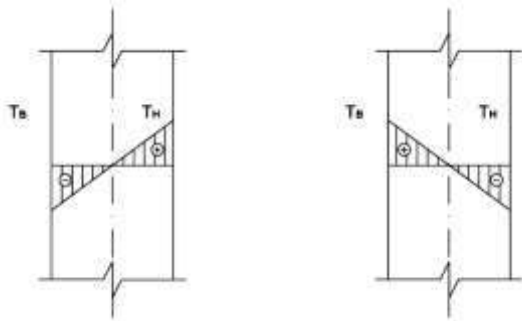
вывод, что повышение температуры до 500<sup>0</sup>С приводит к снижению временного сопротивления  $\sigma_b$  на 75%. При этом наиболее интенсивное снижение прочности происходит при температурах  $T > 250^0$ С.

При большом температурном градиенте по толщине стенки трубы  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_b - T_n$ , где  $T_b$  и  $T_n$  - температура внутренней и наружной поверхности) в металле возникает окружные напряжения  $\sigma_t$ :

$$\sigma_t = \pm \frac{\alpha \cdot E \Delta T}{2(1 - \mu)} \approx \pm 0,715 \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (10)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $E$  – модуль упругости.

На практике возможны два варианта распределения температурных напряжений в трубе, и они показаны на рис. 4.



а) при  $\Delta T > 0$ ; б) при  $\Delta T < 0$ .

$$\tau = \int_{H_0}^{H_{np}} \frac{dH}{0,5 \cdot \delta_0 \cdot \exp(0,5 \cdot \varepsilon_i) \cdot A \cdot \varepsilon_i^m + v_0 \left[ (1 + k_\sigma \cdot C \cdot \varepsilon_i^n) (1 + k_\varepsilon \cdot \varepsilon_i) \right]} \quad (12)$$

В результате интегрирования получим следующее уравнение долговечности ствола дымовой трубы с учетом коррозионного и температурного воздействия:

$$\tau_T = \frac{t_0}{v_0} (1 - K_{HT}) \cdot (1 + k_\sigma \cdot \varphi_{\sigma_T}^T \cdot \sigma \sqrt{K_H \cdot T}) \quad (13)$$

где  $K_H = \sigma_0 / \sigma_T \cdot \varphi_{\sigma_T}^T$ ;  $\tau$  – время до наступления текучести;  $K_{HT}$  – коэффициент использования несущей способности по  $\sigma_T$  при заданной температуре  $T$ .

Оценка долговечности металлических дымовых труб при коррозионном и температурном воздействии при длительном сроке эксплуатации позволяет определить остаточный ресурс, продлить срок эксплуатации и предотвратить возможные аварии металлических дымовых труб.

Неравномерный нагрев стенок дымовых трубы приводит к образованию плоского напряженного состояния с равными компонентами напряжений. Нагревание внутренней поверхности металлической трубы  $\Delta T > 0$  создает во внутренних волокнах сжатие, а внешней поверхности  $\Delta T < 0$  – растяжение.

В дальнейшем при температурном нагреве и отсутствии внешних нагрузок в стенках труб развиваются значительные напряжения, с порогом механохимической коррозии и снижения ресурса дымовых труб.

Долговечность ствола дымовой трубы с учетом лишь температурного градиента может быть определена по формуле:

$$\tau_g = \frac{t_0}{v_0} / (1 + 0,715 \cdot k_\sigma \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta T), \quad (11)$$

где  $\tau_g$  – время до полного разрушения трубы.

Для определения совместное воздействие высоких температур и коррозионного износа на долговечность металлических дымовых труб проведем численное интегрирование уравнения долговечности элементов металлической дымовой трубы толщиной  $t$  (11) и температурным коэффициентом снижения прочности  $\varphi_{\sigma_g}^T$  (8):

ЛИТЕРАТУРА:

1. ДБН В.2.6-163.2010. Сталеві конструкції. Норми проектування.
2. Дымовые трубы. Теория, практика конструирования и сооружения. / Под редакцией С.В. Сатьянова. М.: Стройиздат. 2001. – 150.
3. Жаростойкие материалы. / К.П.Щедров, Э.Л.Гакман. М. Машиностроение, 1965. - 187.
4. Защита строительных конструкций от коррозии. Свод правил / СП 28.13330. 2012. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85. М.: - Минрегионразв. 2012.- 123с.
5. Коррозионная стойкость металлов и сплавов. / В.Н. Дятлова. М. Машиностроение, 1964. – 213.

6. Металлические конструкции. Общий курс. / Г.С. Ведеников, Е.И. Беленя, В.С. Игнатъева. М. Стройиздат, 1998. - 760с.
7. Методика обследования технического состояния промышленных дымовых и вентиляционных труб. Стандарт саморегулирующей организации. / СТО СРО ЭТМП 03-2016. М., - Энерготеплометаллургпроект. - 2016. – 86с.
8. Надежность и жизнеспособность металлических дымовых труб компрессорных станций магистрального газопровода «Кременчуг-Ананьев-Черновцы-Богородчаны» после длительного срока эксплуатации. / Яровой С.Н., Горовый А.И. М.: - МГСУ. 2013. - С.251-256.
9. Промышленные дымовые и вентиляционные трубы. Справочник проектировщика. / Ф.П. Дужих, В.П. Осоловский, М.Г. Ладыгичев. М.: Теплотехник. 2004. – 233с.
10. Эксплуатационная пригодность металлических дымовых труб печей трубопрокатного цеха №1 ОАО «Тагмет» после длительного срока эксплуатации / И.И.Ведяков, М.И. Гукова, С.Н. Яровой // Строительная механика и расчет сооружений. Научно-технический журнал. №2. М.: - ЦНИИСК им. Кучеренко, 2016. – С.7-12.
11. EN 1991-1-4. Eurocode 1: Action on structures – Part 1-4 General actions – Wind action. –Brussels: CEN, 2002.
12. Steel Structures Design. USA: New Publication. Williams A.2010.

*Рецензент: д-р техн. наук М.Ю. Избаш*

УДК 691.328.43: 691.175.3, 691:620.173.22/.24

**Орешкин Д.А.,**

*ООО Технологическая группа «ЭКИПАЖ», г. Харьков*

**Бондаренко Ю.В., Спиранде К.В., Мольский М.М.**

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры*

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТОРКРЕТИРОВАНИЕМ БЕТОНОМ С КОМПОЗИТНЫМ АМИРОВАНИЕМ**

**Введение.** Одним из путей создания эффективных несущих строительных конструкций повышенной долговечности, особенно при эксплуатации в агрессивной по отношению к стальной арматуре среде, является разработка бетонных конструкций, армированных композитной (неметаллической) арматурой [1], в том числе стеклокомпозитной.

Помимо коррозионной стойкости достоинствами стеклокомпозитной арматуры являются: высокая прочность при растяжении, низкий удельный вес (легче металлической в 3...4 раза), химическая и магнитная инертность, диэлектрические свойства, радиопрозрачность и низкий коэффициент теплопередачи.

Проблема восстановления эксплуатационных показателей существующих конструкций зданий и сооружений, в том

числе сетей водоотведения, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред, решается различными технологическими и конструктивными методами [2]. В практике усиления конструкций, работающих в агрессивных средах, нашли применение торкретбетонные рубашки и обоймы, армированные стержнями, решетками и сетками из неметаллической композитной арматуры. Одним из производителей такой арматуры является ООО ТГ «ЭКИПАЖ» (г. Харьков), выпускающее стеклокомпозитную арматуру марки 05АКСП («условно-гладкая») по ТУ 25.2-21191464-02:2008 и др.

Использование композитной арматуры, в том числе изготовленных из неё конструкционных сеток и решеток для усиления железобетонных несущих и ограждающих элементов различного назначения исследуется и узаконено рядом