

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТРЕЩИН НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Сообщение 3. Температура и напряжения в стенке трубы при охлаждении*

А.Я. НЕДОСЕКА, С.А. НЕДОСЕКА

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев–150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В Сообщении 3 подведен итог анализа тепловых полей и температурных напряжений, возникающих и перераспределяющихся на трех стадиях эксплуатации трубопроводов, работающих при высоких температурах – стадии пуска, стадии стационарного режима эксплуатации и на стадии остывания при прекращении эксплуатации. Установленные особенности теплового воздействия на материал стенки труб показывают причины появления трещин на их внутренней поверхности. Показано влияние теплоотвода на характер распределения и значение температуры в стационарном состоянии трубы при эксплуатации. Установлено, что нарушение режима теплоотвода приводит к необходимости увеличения тепловложения для компенсации отводимого тепла и ведет к росту температурных напряжений. Библиогр. 6, рис. 5.

Ключевые слова: температура, температурные напряжения, длительная прочность

Представленный ниже материал является заключительной стадией исследований влияния температурного поля, возникающего и изменяющегося в трубах при пуске, эксплуатации в стационарном режиме и прерывании его эксплуатации. Рассматривая этап остановки эксплуатации трубопровода и его охлаждения, получим аналитическое выражение, описывающее этот процесс (рис. 1). Так, проинтегрировав выражение (1) из работы [1], получим формулу для расчета температурного поля в этом случае:

$$\theta = \frac{q_a}{\pi \lambda_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left\{ \exp \left[-\alpha_n^2 a_k (t - t_0) \right] - \exp \left(-\alpha_n^2 a_k t \right) \right\}}{\left(\alpha_n^2 + h^2 \right)} \dots \frac{J_0 \left(\alpha_n a \right) J_0 \left(\alpha_n r \right)}{b^2 J_0^2 \left(\alpha_n b \right)}, \quad (1)$$

где θ – температура в трубе, °С; q_a – поток тепла, передающегося внутренней стенке трубы движущимся паром, кал/с·см; a_k – коэффициент температуропроводности, см²/с; a и b – внутренний и наружный радиусы трубы, см; h – коэффициент теплоотдачи, см⁻¹; t_0 – время эксплуатации трубопровода в нагретом состоянии, с; t – текущее время, с; r – координата в направлении радиуса трубы, см; α_n – корни характеристического уравнения [2, 3]:

$$\alpha_n J_1 \left(\alpha_n b \right) + h J_0 \left(\alpha_n b \right) = 0,$$

где J_0 и J_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядка.

Следует отметить, что приведенная формула описывает квазистатическую часть температурного поля. При текущем времени $t = t_0$ формула позволяет рассчитать нагревающую часть поля в стационарном режиме, а при $t > t_0$ описывает процесс охлаждения трубы.

На рис. 2 показано изменение температуры в трубе диаметром 630 мм и толщиной стенки 25 мм от начала нагрева с выходом в стационарное состояние и охлаждение после рабочего режима в течение 30 ч, а также квазиста-

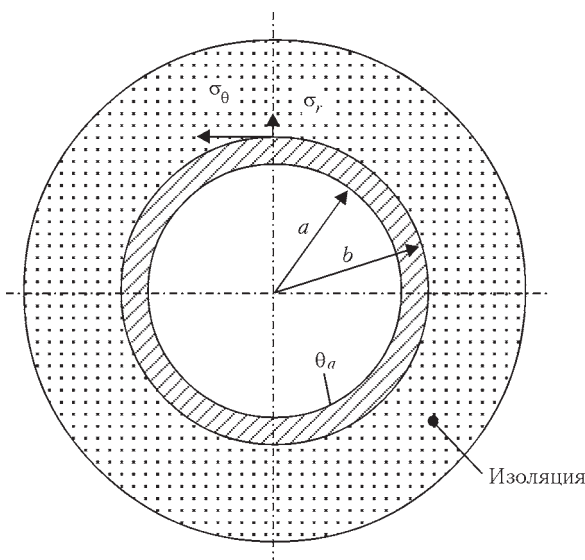


Рис. 1. Схематическое изображение трубы паропровода в изоляционном пакете

*Сообщения 1, 2 см. в журналах «Техническая диагностика и неразрушающий контроль». – 2015. – №№ 3, 4.

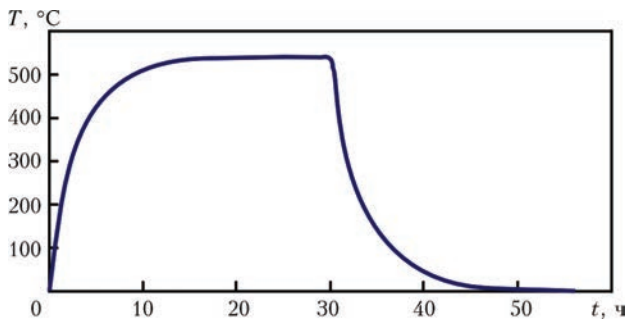


Рис. 2. Насыщение теплом трубы в процессе проведения пусковых работ. Квасистатическая составляющая. Расчет приведен для внутренней стенки трубы, $a = 29$ см; в момент $t_0 = 30$ ч прекращена подача тепла

тическая составляющая температурного поля. Расчеты были выполнены при следующих исходных данных: $q_a = 145$ кал/см·с; $h = 0,0161$ см⁻¹; $a = 29$ см; $b = 31,5$ см; $t_0 = 30$ ч; $\lambda_0 = 0,05$ кал/см·с °С; $a_k = 0,04$ см²/с.

График изменения температурного поля в трубе при нагреве показывает достаточно плавное и

медленное повышение температуры. В момент прекращения подачи тепла ($t_0 = 30$ ч) температура также достаточно плавно и медленно уменьшается до полного остывания примерно через 55 ч.

Напряженное состояние материала трубы для рассмотренного случая будет описываться формулами (2) из сообщений [1, 4], где величина γ_n в соответствии с формулой (1) настоящей публикации имеет вид:

$$\gamma_n = \frac{q_a}{\pi \lambda_0} \frac{\left\{ \exp\left[-\alpha_n^2 a_k (t - t_0)\right] - \exp\left(-\alpha_n^2 a_k t\right) \right\}}{\left(\alpha_n^2 + h^2\right) b^2} \dots \frac{J_0\left(\alpha_n a\right)}{J_0^2\left(\alpha_n b\right)} \quad (2)$$

Тогда

$$\sigma_\theta = \alpha_T E \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n \left\{ -J_0\left(\alpha_n r\right) + \frac{J_1\left(\alpha_n r\right)}{\alpha_n r} + \frac{J_1\left(\alpha_n a\right)}{\alpha_n a} \right\}$$

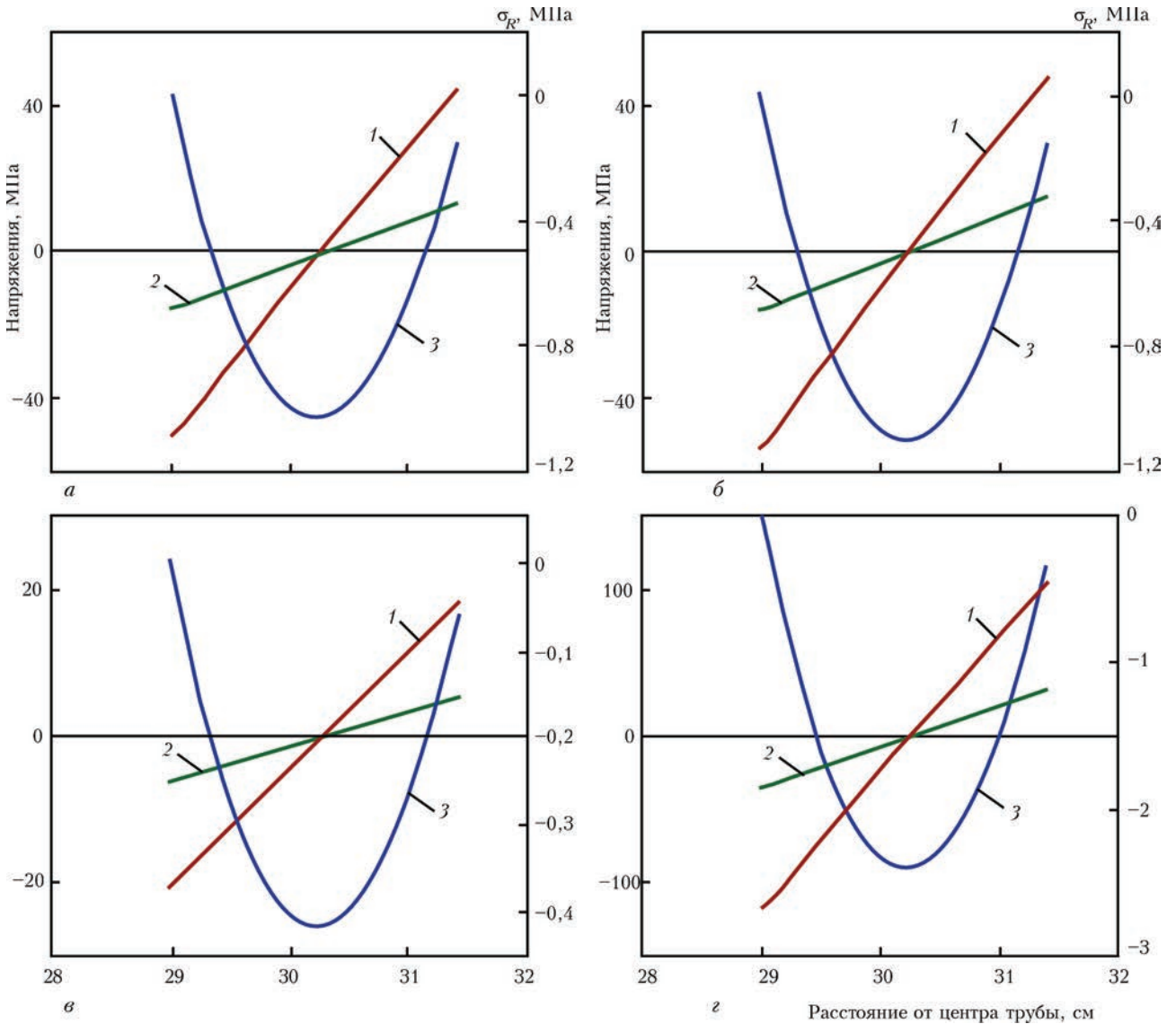


Рис. 3. Температурные напряжения в стенке трубы при остывании с различными условиями тепловода. Расчет в момент начала остывания (а, б, в) и спустя 5 ч после остановки трубопровода (г); а, в - $q_a = 145$ кал/см·с; $h = 0,0161$ см⁻¹; в - $q_a = 155$ кал/см·с; $h = 0,03$ см⁻¹; г - $q_a = 320$ кал/см·с; $h = 0,07$ см⁻¹ (1 - σ_θ ; 2 - σ_z ; 3 - σ_R)

$$\sigma_r = \alpha_T E \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n \left\{ -\frac{J_1(\alpha_n r)}{\alpha_n r} + \frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \frac{b^2}{r^2} \left[\frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{J_1(\alpha_n b)}{\alpha_n b} \right] \right\} - \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \frac{b^2}{r^2} \left[\frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{J_1(\alpha_n b)}{\alpha_n b} \right] \quad (3)$$

$$\alpha_n J_1(\alpha_n b) + h J_0(\alpha_n b) = 0,$$

где $h = -\alpha_T / \lambda_0$; знак «-» учтен в формуле приведенного спектрального уравнения (далее используется абсолютная величина); α_T – коэффициент линейного расширения стали 15X1M1Ф, 1/°C, равный $12,5 \cdot 10^{-6}$ 1/см; E – модуль упругости стали МПа, равный $2 \cdot 10^5$ МПа.

На рис. 3 представлены графики распределения температурных напряжений в трубе, построенные в начале остывания (на границе стационарного состояния), и для случая снизившейся температуры (рис. 3, а, в). Начало отсчета по времени $t \geq t_0 = 30$ ч или 108000 с. Анализируя температурные напряжения в трубах в процессе охлаждения наблюдаем их уменьшение с течением времени. Это хорошо иллюстрируют графики на рис. 3. На рис. 3 б, г показано напряженное состояние трубы в процессе установившегося режима эксплуатации при повышенных значениях теплоотвода. Так, значение коэффициента теплоотвода для рассматриваемого случая принято равным $h = 0,03$ и $0,07 \text{ см}^{-1}$ (рис. 3, б и г соответственно). Как видим, напряжения в стенке трубы увеличиваются с

ростом интенсивности теплоотвода. Особенно наглядно эта тенденция просматривается при значении коэффициента теплоотвода, равном $0,07 \text{ см}^{-1}$. В этом случае температурные напряжения существенно выросли до значения -110 МПа в отличие от нормального состояния, где они равны -50 МПа. На рис. 3 представлена также третья составляющая температурных напряжений σ_z . Эти напряжения получены при условии плоской деформации трубы вдоль оси z .

Напряжения от внутреннего давления складываются с температурными, а их результирующая показана на рис. 4. Суммарные напряжения при установившемся режиме и лучшей теплоизоляции находятся в пределах, представленных на графике. Следует учесть, что предел длительной прочности для стали 15X1M1Ф, наработавшей 200 тыс. ч, составляет 95 МПа [5, 6], и повышение внутреннего давления может привести к исчерпанию несущих свойств этой стали. График на рис. 4 построен для внутреннего давления в трубе 22 ат, что эквивалентно средним растягивающим напряжениям 28 МПа на наружной поверхности трубы диаметром 630 мм. Если изоляция трубы выполнена надежно (рис. 5) и коэффициент теплоотвода не превышает $h = 0,003 \text{ см}^{-1}$, то температурные напряжения на наружной кромке трубы не будут превосходить 5 МПа, что в сумме с напряжениями от внутреннего давления будет давать величину не более 30 МПа. Эта величина меньше длительной прочности материала после 200 тыс. ч наработки. Следует также отметить, что в этом случае потребуется всего 29 кал/с см для поддержания эксплуатационной способности трубопровода. Уменьшение коэффициента теплоотвода h ниже $0,003 \text{ см}^{-1}$ снижает разницу температур между внутренней и наружной стенками трубы. В этом случае температурные напряжения в трубе будут практически равны нулю (последние формулы для температурных напряжений в Сообщении 2) [4].

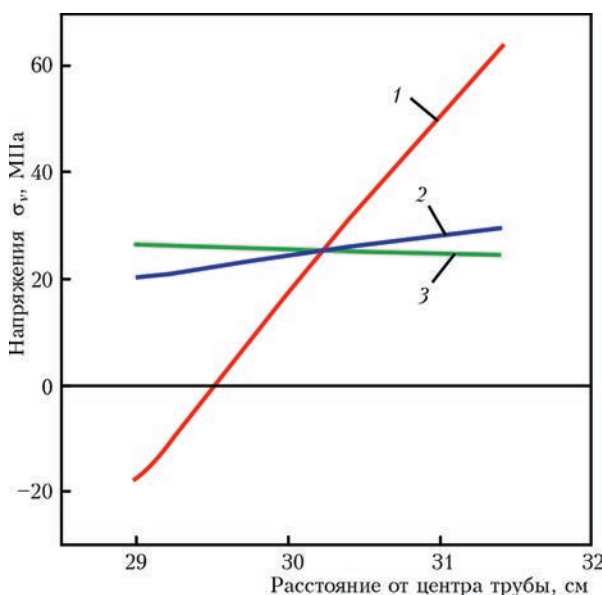


Рис. 4. Суммарные окружные напряжения от внутреннего давления (22 ат) и температурные при $h = 0,0161$ (1) и $0,003 \text{ см}^{-1}$ (2). На графике также представлены напряжения от внутреннего давления $P = 2,2$ Па (3)



Рис. 5. Восстановление теплоизоляции после установки волновода с датчиком акустической эмиссии

Выводы

Наиболее опасным для состояния труб, работающих при высоких температурах, является их нагрев при пуске в эксплуатацию. В этом случае динамическая составляющая температурного поля имеет высокий градиент, приводящий к образованию больших сжимающих напряжений, превосходящих предел текучести материала трубы в узкой зоне в данный момент времени. Последнее приводит к появлению остаточных растягивающих напряжений и возможному образованию продольных трещин на внутренней поверхности трубы.

Следующим по опасности состоянием трубопроводов является ухудшение свойств теплоизоляции, что приводит к повышению напряжений в трубе, а также требует повышения тепловложения для обеспечения штатного режима эксплуатации трубопровода. Необходимо тщательно следить за состоянием теплоизоляции труб во избежание роста температурных напряжений из-за перепада температуры на внутренней и наружной поверхностях трубы. (Следует обратить особое внимание на ремонт теплоизоляции. Свойства установленной изоляции не должны отличаться от таковых основной). Необходимо иметь в виду, что предел длительной прочности материала труб с течением времени уменьшается. Так, для стали 15X1M1Ф после 200 тыс. ч эксплуатации он равен 95 МПа, а для стали 12X1MФ равен 82 МПа [5]. Поскольку напряжения от внутреннего давления складываются с температурными, то при существенном нарушении теплоизоляции их сумма на наружной поверхности трубы может достигнуть предела длительной

прочности материала на данный момент времени и даже превзойти его.

Растягивающие напряжения, возникшие на внутренней поверхности трубы при воздействии высокоградиентного температурного поля в начальный момент времени, с образованием трещин частично уменьшаются.

Прекращение нагрева трубы, связанное с технологической остановкой эксплуатации трубопровода, при высоком качестве изоляции практически не влияет на несущую способность труб.

Каждый последующий пуск трубопровода в эксплуатацию ухудшает его несущую способность за счет повторного возникновения описанных в данной работе динамических процессов при нагреве и выходе на стационарный режим работы.

1. Недосека А.Я., Недосека С.А. О трещинах, возникающих на внутренней поверхности трубопроводов, работающих при высокой температуре. Сообщение 1. Тепловые нагрузки на стенки труб при пуске и эксплуатации // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2015. – № 3. – С. 11–14.
2. Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
3. Грантер К.Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.
4. Недосека А.Я., Недосека С.А. О трещинах, возникающих на внутренней поверхности трубопроводов, работающих при высокой температуре. Сообщение 2. Напряжения в стенке трубы // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2015. – № 4. – С. 14–17.
5. ТУ 14–3–460: 2009/ТУ 27.2–05757883–207: 2009. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов.
6. О применении АЭ технологии при непрерывном мониторинге трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре / Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2014. – № 3. – С. 7–14.

Information 3 summarizes analysis of thermal fields and temperature stresses, developing and being redistributed in three stages of operation of pipelines exposed to high temperatures: commissioning stage, steady operation mode stage, and cooling stage at interruption of operation. Established features of thermal impact on pipe wall material reveal the causes for crack development on their inner surface. Influence of heat removal on the nature of temperature distribution and its values in the pipe steady state in operation is shown. It is found that violation of heat removal mode makes it necessary to increase the heat input to compensate for the removed heat and leads to increase of temperature stresses. 6 References, 5 Figures.

Keywords: temperature, temperature stresses, long-term strength

*Поступила в редакцию
08.12.2015*

СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

III Международная научно-практическая конференция
19–21 апреля 2016 г., Андижан, Узбекистан

Андижанский машиностроительный институт совместно с Туринским политехническим университетом в г. Ташкенте и ЗАО «Дженерал Моторс - Узбекистан» проводят Международную научно-практическую конференцию «Современные материалы, техника и технологии в машиностроении».

Тематика конференции: современное инженерное образование: проблемы и перспективы развития ♦ современное машиностроение ♦ энергообеспечение и энергосбережение в промышленности ♦ современные методы организации и управления производством.

Оргкомитет:

Тел.: (+99874) 223-43-67, 223-43-78

E-mail: andmiedu@umail.uz | <http://conf.andmiedu.uz/>