

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТРЕЩИН НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Сообщение 1. Тепловые нагрузки на стенки труб при пуске и эксплуатации

С. А. НЕДОСЕКА, А. Я. НЕДОСЕКА

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

Акустико-эмиссионный мониторинг трубопроводов, работающих при высоких температурах, показывает наличие зон акустической активности. Понимание механизмов формирования дефектов в таких зонах позволяет повысить качество проводимого АЭ контроля и выработать рекомендации по безопасной эксплуатации трубопроводов. Рассмотрен характер и величины температурных полей, возникающих при внезапном приложении высокой температуры к внутренней стенке трубы. На основе преобразования Лапласа выделена и показана динамическая составляющая температурного поля при внезапном приложении тепловой нагрузки. Установлено наличие высокого градиента распределения температуры в направлении радиуса при динамическом нагреве. Показано, что более благоприятное распределение «пусковой» температуры в стенке трубы происходит при более медленной подаче тепловой нагрузки к ее внутренней стенке. Библиогр. 5, рис. 5.

Ключевые слова: трещины, нагрев, динамическая и квазистатическая составляющие, благоприятный режим пуска

Длительная работа трубопроводов в условиях высоких температур приводит к постепенному накоплению в них рассеянных повреждений, а впоследствии к формированию на их основе трещин и трещиноподобных дефектов. В некоторых случаях на внутренней поверхности трубопроводов возникают трещины достаточно большой длины, ориентированные вдоль образующей трубы и распространяющиеся в глубину трубы на незначительные (до 4...5 мм) расстояния (по данным Л.А. Латушенко, Змиевская ГРЭС).

АЭ мониторинг трубопроводов горячего пром-перегрева (ГПП) [1] показывает наличие зон акустической активности (рис. 1), что свидетельствует о формировании дефектов. Понимание механизмов образования дефектов в таких зонах позволяет повысить качество проводимого АЭ контроля и выработать рекомендации по безопасной эксплуатации трубопроводов.

Отметим, что режимы пуска и остановки оборудования, работающего при высоких температурах, имеет достаточно большое значение для прочности его узлов и отдельных элементов. Наличие гидравлических и пневматических ударов, вызываемых резким изменением режима работы, приводит к подвижности структуры материалов и, как следствие к развитию или перемещению дефектов. Дефекты могут объединяться и прогрессировать. Опасность в значительной степени определяется числом изменений режимов эксплуатации и резкостью этих изменений. В процессе эксплуатации количество дефектов растет, вследствие чего режимы эксплуатации и время нара-

ботки оказывают все большее влияние на общую работоспособность конструкции. В представляемом Сообщении 1 рассматриваются возможные причины появления и роста таких трещин (а также см. продолжение в следующем выпуске журнала).

Рассмотрим случай пуска в эксплуатацию трубопровода горячего промежуточного перегрева пара теплоцентрали большой длины с наруж-

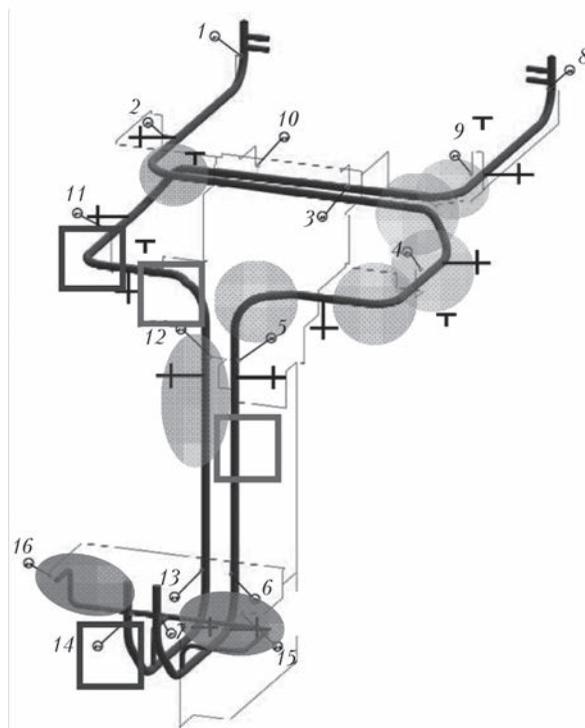


Рис. 1. Схема трубопровода ГПП с местами повышенной АЭ активности (цифрами указаны номера АЭ датчиков, крестиками – технологические отметки)



ным диаметром 630 мм и толщиной стенки 25 мм. Марка материала трубы 15X1M1Ф (рис. 2). Для обследования и выполнения ремонтных работ после непродолжительной остановки оборудования производят подачу горячего пара. При нарушении штатной технологии пуска трубопровода в эксплуатацию возможен термоудар по холодной внутренней стенке трубы. В этом случае возникают значительные напряжения, которые приводят к появлению новых дефектов, движению, а также развитию и слиянию уже существующих, что для материала трубы с большим временем наработки может привести к образованию трещин и разрушению. Можно выделить два этапа воздействия тепла на материал трубы. На первом «внезапно» приложенное к стенке внутренней поверхности трубы тепло приводит к динамическому температурному воздействию на материал. На этом этапе на небольшой глубине стенки происходит резкое образование неравномерного температурного поля. Температуры могут быть невысокие, но их градиент и связанные с ним температурные напряжения достаточно большие. Динамическая часть температурного поля быстро уменьшается и на смену первому этапу приходит второй с более приемлемыми для обеспечения прочности трубы условиями нарастания температуры. Происходит постепенный нагрев трубы вплоть до момента образования стационарного температурного поля. Очевидно, что наиболее опасным моментом пусковых работ является первый этап с большим градиентом распределения температур. Рассмотрим более детально возникновение и стабилизацию температурного поля в трубопроводах при их эксплуатации.

Дифференциальное уравнение, описывающее процесс распространения тепла в стенке трубы для ее элемента единичной длины, может быть записано в виде:

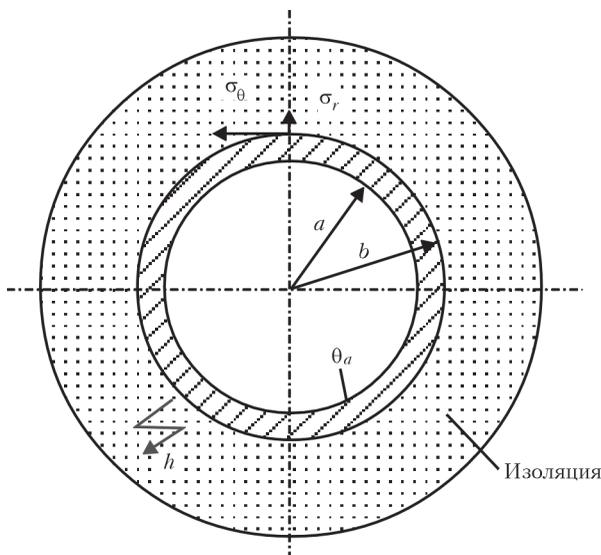


Рис. 2. Элемент трубы паропровода в изоляционном пакете

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} - \frac{1}{a_k} \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

Начальным условием задачи является наличие температуры в стенке трубы в момент времени $t = 0$, т.е. при $t = 0$ температура на внутренней стенке трубы равна θ_a и определяется она количеством тепла Q_a , приложенного к внутренней стенке. Коэффициент температуропроводности a_k для данной стали составляет $0,07 \text{ см}^2/\text{с}$.

Для удовлетворения принятого начального условия проведем преобразование Лапласа [3] по времени t приведенного уравнения (1):

$$\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial r} - \frac{p}{a_k} \bar{\theta} - \frac{\theta_a}{a_k} \exp(-pt) \Big|_0^\infty = 0. \quad (2)$$

Выполненное преобразование Лапласа позволяет выделить начальный тепловой удар, воспринятый трубой в момент нагнетания пара ($t = 0$). Теперь зафиксируем место приложения этой температуры, определяемое δ -функцией по радиусу r . Таким местом является внутренняя стенка трубы. Тогда после выполнения прямого конечного преобразования Ханкеля по координате r выражения (2) получим:

$$-\left(\alpha^2 + \frac{p}{a_k}\right) \bar{\bar{\theta}} + \theta_a \int_0^b \frac{\delta(r-a_0)}{a_k 2\pi r} r J_0(\alpha r) dr. \quad (3)$$

При этом принято, что произвольные постоянные конечного преобразования Ханкеля в сумме равны нулю и образуют характеристическое уравнение условия обратного преобразования. Величина $2\pi r$ в знаменателе подынтегральной функции появилась в результате приведения уравнения (2) к осесимметричному виду путем интегрирования всего выражения (2) в пределах от 0 до 2π с учетом того, что $\delta(\varphi r) = \delta(\varphi)/r$; a_0 – место приложения тепла, в данном случае совпадающее с радиусом внутренней поверхности трубы a .

Тогда уравнение (3) может быть переписано в виде:

$$-\left(\alpha^2 + \frac{p}{a_k}\right) \bar{\bar{\theta}} = -\theta_a \frac{J_0(\alpha a_0)}{2\pi},$$

$$\bar{\bar{\theta}} = \frac{J_0(\alpha a_0)}{2\pi a_k} \frac{\theta_a}{\alpha^2 + \frac{p}{a_k}}.$$

Обратное преобразование Лапласа [3], примененное к данному уравнению, даст:

$$\bar{\theta} = \theta_a \frac{J_0(\alpha a_0)}{2\pi} \exp(-\alpha^2 a_k t).$$

Учитывая, что преобразование Ханкеля применимо лишь при определенных значениях α , обозна-



чим их α_n . Следует также иметь в виду, что обратное конечное преобразование Ханкеля предусматривает α_n как положительный корень приведенного ниже характеристического уравнения [4, 5]:

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

Здесь h постоянная, определяемая из граничных условий. В данном случае это постоянная теплоотвода $h = -\frac{\alpha_T}{\lambda_0} \text{ 1/см.}$

Выполнив обратное конечное преобразование Ханкеля с учетом того, что $\theta_a c \rho F = Q_a$, где c – удельная теплоемкость материала трубы (кал/г °С); ρ – плотность материала (г/см³); F – площадь прогреваемого материала трубы; Q_a – количество тепла в калориях в стенке трубы (кал/см), получим:

$$\theta = \frac{Q_a}{\pi \lambda_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_n^2 a J_0(\alpha_n a) J_0(\alpha_n r)}{(\alpha_n^2 + h^2) b^2 J_0^2(\alpha_n b)} \exp(-\alpha_n^2 a_k t). \quad (4)$$

Построим распределение температуры θ в стенке трубы в зависимости от времени и расстояния от ее центра. Прежде всего необходимо определить величину импульса теплового воздействия на внутреннюю стенку. Предполагая, что перегретый пар, поданный в трубопровод, имеет температуру 550 °С, вычислим импульс тепла с учетом того, что в начальный момент приложения $Q_a = F c \rho \theta_a$.

Примем значение коэффициента теплоотвода равным 0,0161 см⁻¹ [2, 4], коэффициент теплопроводности для стали 15X1M1Ф $\lambda_0 = 0,08$ кал/см·с, размеры трубы: $a = 29$ см, $b = 31,5$ см, $c \rho = 1,14$ кал/см³. С учетом принятых параметров и величины окружности по внутренней стенке трубы, равной $2\pi a$, величину Q_a можно принять равной 6270 кал/см.

На рис. 3 представлены кривые распределения температур в зависимости от времени и расстояния от центра трубы. Как видим, температуры незначительны, но имеют достаточно высокий

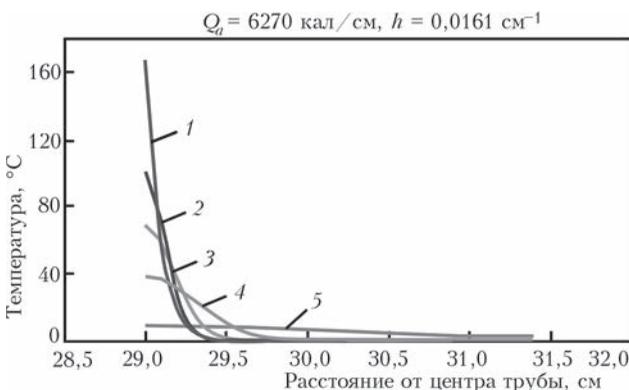


Рис. 3. Температурное поле (формула (4)) в стенке трубы при внезапном температурном ударе: 1 – $t = 0,05$ с; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,6; 5 – 10

градиент. Кроме того, поле быстро исчезает, хотя успевает за короткий промежуток времени привести к образованию благоприятных условий для появления трещин. Механизм возможного процесса трещинообразования на внутренней поверхности трубопроводов будет подробно рассмотрен в Сообщении 2.

Рассмотрим второй этап, когда температура начала распространяться внутрь по стенке трубы, и условия резкого динамического воздействия на материал трубы сменились на более медленный и благоприятный процесс.

Распространение тепла в этом случае может быть получено путем интегрирования выражения (4) в пределах действия непрерывного источника. Тогда после интегрирования получим:

$$\theta = \frac{q_a}{\pi \lambda_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - \exp(-\alpha_n^2 a_k t)] J_0(\alpha_n a) J_0(\alpha_n r)}{(\alpha_n^2 + h^2) b^2 J_0^2(\alpha_n b)}, \quad (5)$$

где q_a имеет размерность кал/см·с и представляет собой непрерывно действующий источник тепла в течение всей последующей эксплуатации трубопровода.

Формула (5) показывает, что в начальный момент времени температура стенки трубы равна нулю, так как динамическое температурное поле исчезло и начал действовать с нуля процесс насыщения теплом материала трубопровода (рис. 4).

Следует отметить, что при $t = \infty$ температурное поле становится стационарным и его градиент в этом случае зависит исключительно от качества изоляции труб, т. е. от условий теплоотвода. Расчеты температуры по формуле (5) для стационарного случая затруднены из-за плохой сходимости суммы ряда (5). Поэтому целесообразно формулу для расчета в этом случае получить непосредственно из дифференциального уравнения без времени t . Не приводя это решение из-за его простоты, покажем лишь сам

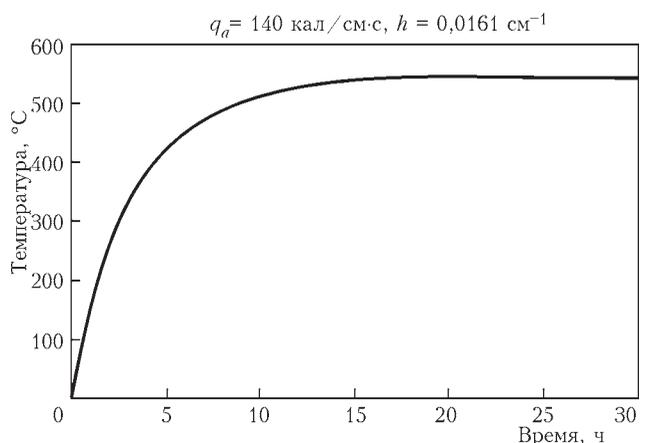


Рис. 4. Насыщение теплом трубы в процессе проведения пусковых работ. Расчет приведен для внутренней стенки трубы (формула (5))

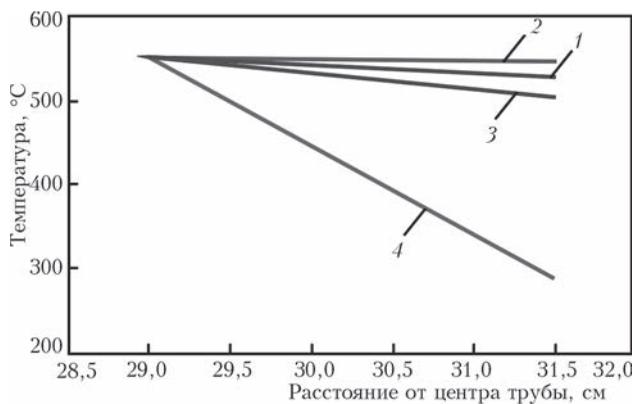


Рис. 5. Установившееся температурное поле в стенке трубы при различном отводе тепла от ее наружной стенки (температура на внутренней поверхности стенки равна 550 °С (формула (6)): 1 – $h = 0,0161$; 2 – $0,003$; 3 – $0,035$; 4 – $0,35$

результат для случая с теплоотводом от наружной стенки трубы h (рис. 5):

$$\theta = \theta_0 \left[1 - \frac{bh \ln\left(\frac{r}{a}\right)}{1 + bh \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \right]. \quad (6)$$

Величины, входящие в формулу (6), те же, что и приняты выше, а θ_0 – непрерывно действующая температура на внутренней стенке трубы. Расчеты показывают, что величина теплоотвода h может существенно исказить характер распределения температуры в стенке трубы и вызвать появление дополнительных по отношению к рабочим напряжений.

Acoustic emission monitoring of pipelines operating at high temperatures, reveals presence of acoustic activity zones. Understanding the mechanisms of defect formation in such zones allows improvement of the quality of performed AE monitoring and issuing recommendations on safe operation of pipelines. Information 1 deals with the nature and magnitude of temperature fields forming at sudden application of high temperature to pipe inner wall. Dynamic component of temperature field at sudden application of thermal load to pipe inner wall was separated and shown, based on Laplace transformation. Presence of a high gradient of temperature distribution in the direction of the radius at dynamic heating was established. It is shown that a more favourable distribution of “starting” temperature in pipe wall occurs a slower application of thermal load to its inner wall.

Key words : cracks, heating, dynamic and quasistatic component, favourable starting mode

Поступила в редакцию
14.03.2015

УЧБОВИЙ ЦЕНТР З НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДП «АЦНК при ІЕЗ ім. Є.О.ПАТОНА НАН УКРАЇНИ»

проводить в м. Києві в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

навчальні курси підготовки фахівців з неруйнівного контролю за методами:

ультразвуковий • радіографічний • магнітний • капілярний • візуальний
контроль герметичності • вихрострумівий • акустико-емісійний • вібродіагностичний
для подальшої сертифікації згідно вимог Європейського стандарту EN ISO 9712:2012 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація і сертифікація персоналу в галузі НК» по 12-ти виробничих секторах.

Адреса проведення навчання:

м. Київ, вул. Боженко, 23, ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАНУ, корпус 6

Детальна інформація:

тел.: (044) 200-46-66, тел./факс: (044) 205-31-66

E-mail: ndt@paton.kiev.ua; інтернет: www.usndt.com.ua (розділ «Сертифікація»)

Выводы

Распространение тепла в стенке трубы при ее нагреве может быть условно разделено на две составляющие – динамическую, выделенную путем преобразования Лапласа исходного дифференциального уравнения, и квазистатическую, описывающую процесс дальнейшего постепенного распространения тепла в стенку трубы.

Для получения благоприятных режимов нагрева трубы при пусках необходимо обратить внимание на необходимость создания условий более «мягкого» теплового нагружения трубы, особенно в начальный момент времени. Обеспечить дальнейшее постепенное поднятие температуры в пределах не менее 25...30 ч.

Предложенные формулы могут быть использованы при расчете температурного поля действующих трубопроводов с целью выбора наиболее благоприятных условий их пуска и эксплуатации.

1. Патон Б. Е., Лобанов Л. М. О применении АЭ технологии при непрерывном мониторинге трубопроводов энергетических комплексов, работающих при высокой температуре // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2014. – № 3. – С. 7–14.
2. Мак-Адамс. Теплопередача. – М.: Металлургиздат, 1961. – 278 с.
3. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. – М.: Наука, 1971. – 288 с.
4. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
5. Грантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.