



УДК 621.129.14

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, О. И. БОЙЧУК, С. А. КУШНИРЕНКО,
М. А. ЯРЕМЕНКО, А. Ю. ФЕДЧУН, А. А. ЕЛКИН, Б. М. ОБОДОВСКИЙ

Рассмотрены два случая возникновения температурных напряжений в трубе с нарушенной теплоизоляцией. Показано, что даже в трубе с толщиной стенки средней величины возникает объемное напряженное состояние с переменными во времени температурными напряжениями. Цикличность их изменения способствует перемещению и росту внутренних дефектов в материале.

The paper deals with two cases of development of temperature stresses in a pipe with damaged thermal insulation. It is shown that a bulk stressed state with temperature stresses variable in time develops even in a pipe with a medium wall thickness. The cyclic nature of their variation promotes displacement and growth of inner defects in the material.

Технологические трубопроводы, работающие при высоких (до 500 °С) температурах, рассчитываются на длительную прочность и ползучесть с учетом действующего напряженного состояния, вызванного внутренним давлением рабочего вещества. При этом предполагают, что температурный режим стабилен и обеспечивается специальными конструкционными решениями, включая качественную наружную изоляцию трубы. Однако с течением времени изоляционное покрытие труб может быть нарушено и наружная стенка трубы будет подвержена действию нестационарного воздушного потока, степень воздействия которого будет зависеть от места расположения трубопровода и интенсивности движения воздушных потоков в месте нарушения целостности тепловой изоляции (рис. 1). Если учесть, что материал труб находится также в условиях протекающих общих коррозионных процессов, газовой коррозии, действие которых усиливается переменными напряжениями, становится ясно, что вопросы минимизации напряженного состояния материалов труб достаточно актуальны.

В данной статье показано, как влияет нарушение изоляции трубопроводов на возникновение в трубе дополнительных напряжений, снижающих эксплуатационные возможности трубы. При нарушении в процессе эксплуатации термоизоляции появляется дополнительный теплоотвод с поверхности трубы в месте нарушения изоляции и возникает, как следствие, переменное по толщине трубы температурное поле, появляются дополнительные, иногда значительные, температурные напряжения. Возникшие напряжения складываются с напряжениями действующими от внешней нагрузки и могут привести к нарушению режима работы трубы и связанного с ней оборудования.

Для оценки влияния нарушения теплоизоляции на температурное поле технологических трубопроводов были проведены специальные эксперименты на реальных конструкциях, где в отдельных местах была специально нарушена конструкция изоляционного покрытия. Эксперименты показали, что температура на наружной поверхности изоляционного покрытия ощутимо повышается в зависимости от степени его нарушения. На рис. 2 в правой части показана шкала прибора, настроенная в данном случае в диапазоне от 46 до 237 °С. Выше шкалы приведена температура изоляции трубы 60,9 и 121 °С (крестики с цифрой 1) в выбранном оператором месте. Так, при температуре внутренней стенки трубы 475 °С температура на

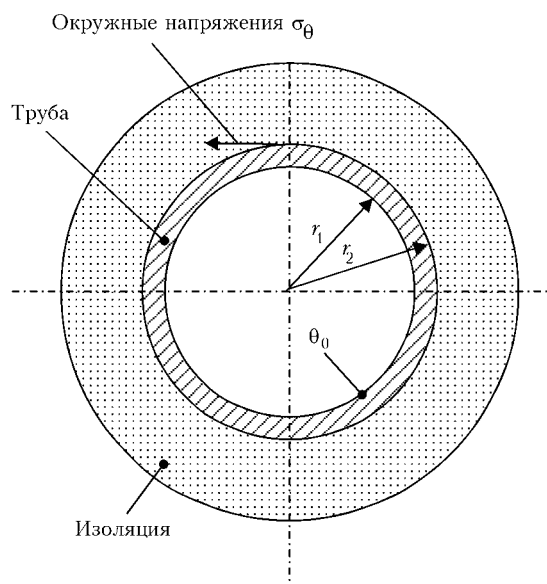


Рис. 1. Поперечное сечение цилиндрического технологического трубопровода с теплоизоляцией (ось z направлена перпендикулярно плоскости чертежа)



наружной поверхности изоляции может достигать величины от 60 до 120 °С. Таким образом, температура наружной стенки трубы при нарушении теплоизоляции становится ниже температуры ее внутренней стенки, что, как было сказано выше, приводит к искажению температурного поля в трубе и, как следствие, к появлению температурных напряжений.

Учитывая сложность измерения температуры наружной стенки трубы без нарушения теплоизоляционного слоя, распределение температуры в ней изучали путем аналитического моделирования с учетом проделанных экспериментальных измерений. При этом сток тепла с наружной поверхности трубы задавался либо на основании данных эксперимента по коэффициенту теплоотдачи для подобных условий, либо путем введения функции стока тепла, близкого по своему действию к данным проведенных экспериментов.

Рассмотрим цилиндрическую протяженную трубу (рис. 1) из стали А335-Р11 с пределом прочности 413 МПа, пределом текучести 207 МПа, содержащей до 1,25 % хрома и 0,5 % молибдена, вырезанную из трубопровода перегретого пара, находящийся под воздействием неравномерного температурного поля. Эту задачу теплопроводности можно разбить на две части — первая часть представляет случай, когда теплоотводящие потоки незначительно изменяются во времени и температурное поле успевает приобрести стационарный характер. Вторая — случай, когда потоки теплоотвода меняются достаточно интенсивно и процесс становится нестационарным. Рассмотрим вначале более простой случай, когда труба находится под воздействием плоского осесимметричного температурного воздействия. Температурное поле θ_n в этом случае может быть рассчитано с использованием дифференциального уравнения стационарной температурной задачи в полярных координатах:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0, \quad \theta = \theta_0 \left[1 - \frac{\frac{\alpha}{\lambda} r_2 \ln(r/r_1)}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} r_2 \ln(r_2/r_1)} \right],$$

$$\theta = \theta_0 [1 + k \ln(r/r_1)], \quad (1)$$

при граничных условиях:

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} = \alpha \theta \quad \text{при } r = r_2,$$

$$\theta = \theta_0 \quad \text{при } r = r_1,$$

где $k = \frac{\alpha r_2}{\lambda} \frac{1}{1 + \frac{\alpha r_2}{\lambda} \ln(r_2/r_1)}$; θ — текущее значение температуры в стенке элемента трубы, К; α —



Рис. 2. Типичное в инфракрасном свете распределение температуры в элементах трубопроводов с нарушенной теплоизоляцией

коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); θ_0 — температура внутренней стенки трубы (рабочего вещества), °С (К); r_1, r_2 — внутренний и наружный радиусы трубы, см (м).

Значения коэффициентов теплоотдачи α для труб без теплоизоляции при различных условиях отвода тепла с наружной поверхности приведены ниже [6, 10], Вт/(м²·К): неподвижный воздух — 12,6...21; незначительное перемещение воздуха — 42; сильное порывистое движение воздуха — 210.

С учетом значений коэффициентов теплоотдачи построены графики распределения температуры по толщине стенки элемента трубы (рис. 3, 4). Из графиков видно, что штатная ненарушенная изоляция трубы и изоляция с незначительным пропусканием тепла наружу $\alpha = 2,1$ Вт/(м²·К) обеспечивают практически равномерную температуру по толщине стенки трубы. Незначительные потери тепла приводят к изменению температуры на наружной стенке трубы приблизительно на 20 °С. Увеличение интенсивности теплоотвода за счет существенного нарушения изоляции приводит к большему понижению температуры на наружной стенке трубы (оголенная труба и наличие охлаждения разной интенсивности). При этом температура



наружной стенки трубы может понизиться до 140 °С (интенсивный теплоотвод с $\alpha = 210$ Вт/(м²·К)). Ниже будет показано, что такое глубокое понижение температуры приводит к появлению больших температурных напряжений.

Рассмотрим влияние нарушения теплоизоляции трубы на величину возникающих в ней температурных напряжений. Температурные напряжения в трубе в этом случае могут быть рассчитаны, исходя из следующего дифференциального уравнения [10]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} - \frac{\varphi}{r^2} = -\alpha_t E \frac{\partial \theta}{\partial r}. \quad (2)$$

Решая уравнение (2), переходим к следующим общим формулам:

$$\sigma_r = -\frac{E}{r^2} \left(\int (\alpha_t \theta) r dr \right) + \frac{C_1}{2} + \frac{C_2}{r^2},$$

$$\sigma_\theta = E \left(-(\alpha_t \theta) + \frac{1}{r^2} \int (\alpha_t \theta) r dr \right) + \frac{C_1}{2} - \frac{C_2}{r^2}. \quad (3)$$

После подстановки значений постоянных C_1 , C_2 и стационарного температурного поля (1) получим:

$$\sigma_r = \frac{\alpha_t E \theta_0 k}{2} \left[\ln \left(\frac{r}{r_1} \right) - \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \frac{r_2^2}{r^2} \frac{r^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right], \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha_t E \theta_0 k}{2} \left[1 + \ln \left(\frac{r}{r_1} \right) - \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \frac{r_2^2}{r^2} \frac{r^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right]. \quad (5)$$

Графики температурных окружных напряжений, рассчитанные по формулам (4) и (5) для трубы диаметром 508 мм с толщиной стенки 38,1 мм, при различных условиях отвода тепла приведены на рис. 3.

Учитывая, что труба имеет большие размеры вдоль оси z , и ее деформация в этом направлении $\varepsilon_z + \alpha \theta$ должна быть равна нулю, появится составляющая напряжений σ_z , равная $\nu(\sigma_r + \sigma_\theta)$. На рис. 5 напряжения σ_z для $\alpha = 210$ Вт/(м²·К) показаны пунктиром.

Показанные на графиках напряжения и температуры представляют, как было сказано, стационарный вариант теплоотвода, когда было достаточно времени, чтобы в результате изменения условий теплоотвода температурный режим в трубе приобрел стационарный характер на новом уровне. Для исследования влияния нестационарного процесса изменения температуры на характер распределения напряжений в трубе необходимо рассмотреть более общий случай, когда температура зависит не только от координаты r , но и от вре-

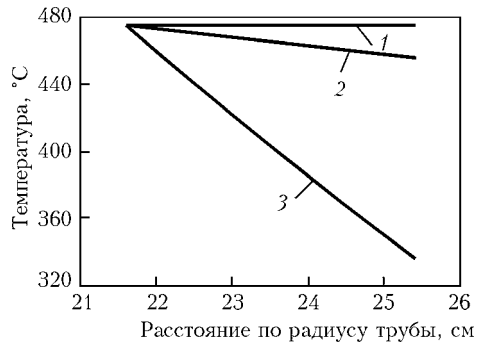


Рис. 3. Распределение температуры в стенке трубы 508×38,1 мм при различных условиях теплоотвода, Вт/(м²·К): 1 — 2,1; 2 — 21; 3 — 210

мени t . Дифференциальное уравнение в этом случае принимает вид [10]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} - \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{Q}{2\pi\lambda r b} \delta^+(r - r_3) \delta^+(t), \quad (6)$$

где Q — энергия стока тепла с наружной поверхности стенки трубы в окружающую среду, Дж (кал); $a = \lambda/c\rho$ — коэффициент температуропроводности, м²/с (см²/с); c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) (кал/г °С); ρ — плотность материала, т/м³ (г/см³); b — ширина вырезанного кольца, принятая равной 1 см; r_3 — фиктивный радиус окружности, где приложен интенсивный сток тепла, который определяется из первого граничного условия на боковых поверхностях трубы: $\partial\theta/\partial r = \alpha\theta$ при $r = r_2$; $\theta = 0$ при $r = r_1$; начальные условия: $\theta = 0$ при $t = 0$.

Решаем уравнение (6) методом интегральных преобразований, предполагая, что отвод тепла осуществляется с диска бесконечных размеров на окружности радиуса r_3 . Возвращение к трубе конечных размеров осуществим граничными условиями для радиальных напряжений ($\sigma_r = 0$ на границе r_1 и r_2 , см. рис. 1). Выражение для расчета температуры θ после прямых и обратных преобразований Лапласа и Ханкеля примет вид:

$$\theta = -\frac{Qa}{2\pi\lambda} \int_0^\infty \alpha J_0(\alpha r) J_0(\alpha r_3) \exp(-\alpha^2 a t) d\alpha, \quad (7)$$

где J_0 — функции Бесселя первого рода нулевого порядка от действительного аргумента; α — параметр преобразования Ханкеля.

Решая интеграл (7), получаем:

$$\theta = -\frac{Q}{4\pi\lambda b t} \exp\left(-\frac{r^2 + r_3^2}{4at}\right) I_0\left(\frac{r r_3}{2at}\right), \quad (8)$$

где I_0 — функция Бесселя первого рода нулевого порядка от мнимого аргумента.

Температуры, рассчитанные по этой формуле, приведены на графиках рис. 6 (при расчете

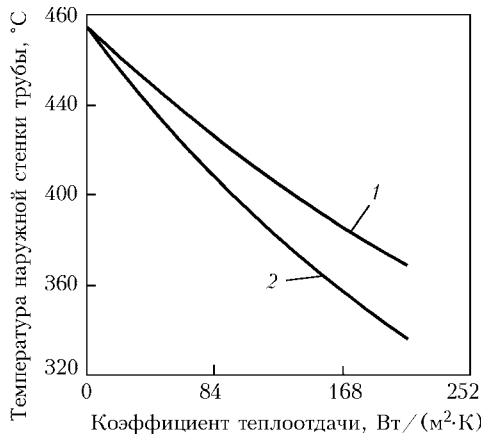


Рис. 4. Влияние интенсивности теплоотвода на температуру наружной стенки труб двух диаметров, мм: 1 — 273×21,4; 2 — 508×38,1

энергии стока тепла с наружной поверхности трубы коэффициент теплоотдачи принимался равным $\alpha = 10^4$ Вт/(м²·К). Тогда $Q = 4399,3$ Дж, где t_0 — время действия стока тепла, принятое равным 1 с; $b = 10^{-2}$ м. Для хромоникелевых сталей $a = 4 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 21,0$ Вт/(м·К); $\alpha_T = 11 \cdot 10^{-6}$ 1/К; $E = 2 \cdot 10^5$ МПа). Как видно из графиков, распределение температуры в трубе существенно зависит от времени, прошедшего с момента прекращения действия мгновенного стока тепла. В первые моменты времени распределение температуры по толщине стенки трубы имеет большой градиент. В следующие моменты крутизна распределения становится меньше, графики более пологие. Наложение кривых распределения температуры, показанных на графиках рис. 4, на графики рис. 3 даст распределение температур в общем

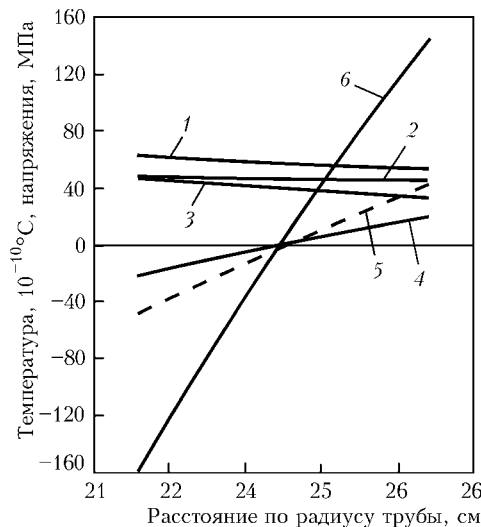


Рис. 5. Распределение температуры и окружающих температурных напряжений в стенке трубы 508×38,1 мм без изоляции при различных условиях теплоотвода, Вт/(м²·К): I — $\alpha = 21$; II — $\alpha = 210$ (кривые 2, 3 — соответственно температура при условиях I, II; 4, 6 — соответственно напряжения при условиях I, II; 1, 5 — соответственно напряжения от внутреннего давления и вдоль оси z при условии II)

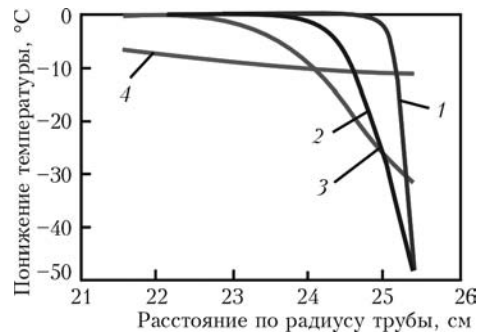


Рис. 6. Понижение температуры стенки трубы 508×38,1 мм, вызванное мгновенным интенсивным (10^4 Вт/(м²·К)) стоком тепла с ее наружной поверхности спустя 1...180 с с момента прекращения действия стока, с: 1 — 1; 2 — 5; 3 — 15; 4 — 180

случае действия обоих стоков — стационарного и переменного во времени.

Воспользуемся, как и ранее, выражениями (3) и (6) для расчета напряженного состояния в трубе в случае действия порывов ветра, дождя и снега на ее оголенную наружную поверхность. Определив произвольные постоянные C_1 и C_2 в выражениях (3) из условий равенства нулю напряжений σ_r на внутренней и наружной стенках трубы, получим следующие значения постоянных и формулы для расчета напряжений σ_r и σ_θ :

$$C_2 = -\frac{\alpha_1 E r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\int_{r_1}^{r_2} \theta r dr - \frac{r_2^2 r_1}{r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} \theta dr \right), \quad (9)$$

$$\frac{C_1}{2} = \frac{\alpha_r E}{r_1^2} \left[\int_{r_1}^{r_1} \theta r dr \right] + \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left[\int_{r_1}^{r_2} \theta r dr - \frac{r_2^2 r_1}{r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} \theta dr \right].$$

После несложных преобразований и оценки входящих в формулы членов получим выражения для σ_θ и σ_r :

$$\sigma_\theta = -\frac{\alpha_1 E Q a}{2\pi \lambda b} \left[-\frac{\exp\left(\frac{r r_3}{2at} - \frac{r^2 + r_3^2}{4at}\right)}{2at \sqrt{\pi \frac{r r_3}{at}}} + \frac{1}{r^2} \int_{r_1}^r \theta r dr + \frac{1}{r^2} \left[\frac{r^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\int_{r_1}^{r_2} \theta r dr - \frac{r_2^2 r_1}{r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} \theta dr \right) + \frac{r_2^2 r_1}{r_1^2} \int_{r_1}^r \theta r dr \right] \right], \quad (11)$$

$$\sigma_r = \frac{\alpha_1 E Q a}{2\pi \lambda b r^2} \left[-\int_{r_1}^r \theta r dr + \left(\frac{r^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} \theta r dr + \left(\frac{r^2}{r_1^2} - \frac{r_2^2}{r_1^2} \frac{r^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right) \int_{r_1}^r \theta r dr \right) \right], \quad (12)$$

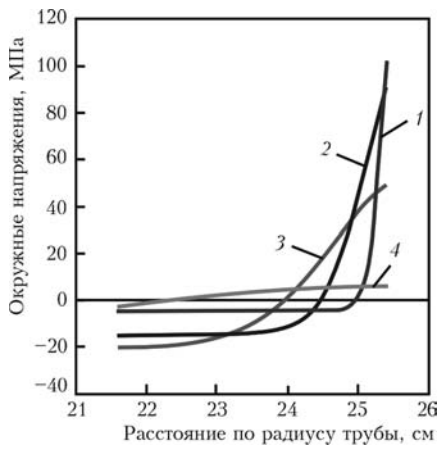


Рис. 7. Окружные напряжения в трубе 508×38,1 мм с поврежденной теплоизоляцией в диапазоне температур от 1 до 180 с после мгновенного приложения интенсивного (10 Вт/(м²·К)) стока тепла, с: 1 — 1; 2 — 5; 3 — 15; 4 — 180

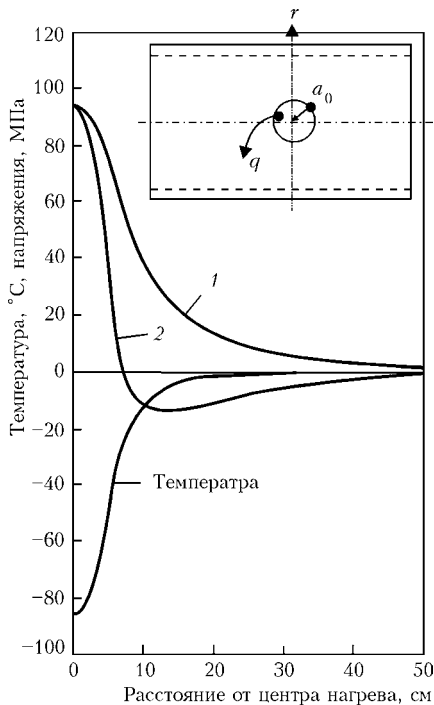


Рис. 8. Радиальные (1) и тангенциальные (2) напряжения на наружной поверхности трубы 508×38,1 мм при стационарном отводе тепла из круга радиусом a_0 наружной поверхности

где r , r_1 и r_2 — значения параметра r в подынтегральной функции правой части формулы (10) (учитываются в выражениях (11, 12) в зависимости от символов над интегралами). Формулы (11, 12) для σ_θ и σ_r достаточно просто реализуются на персональном компьютере.

Температурные напряжения всецело зависят от градиента кривых распределения температуры. Так, на рис. 7 показано распределение напряжений по толщине стенки трубы для четырех моментов времени — от 1 до 180 с момента прекращения действия мгновенного стока тепла. Видно, что градиент изменения температуры с изменением радиуса трубы с увеличением времени

становится все меньше. Следует также отметить, что, несмотря на сравнительно небольшую толщину стенки трубы в ней возникает объемное напряженное состояние с напряжениями σ_z , составляющими 1/3 по сравнению с окружными σ_θ и напряжениями σ_r , незначительными по своей величине. Малые величины радиальных напряжений объясняются сравнительно небольшой толщиной стенки трубы. Окружные напряжения соизмеримы с напряжениями в стационарном режиме и могут достигать существенной для влияния на несущую способность трубы величины.

Следует отметить, что определенный вес в оценке работоспособности материала трубы приобретает динамика изменения напряжений, возникающих при переменном температурном поле. Практически мы имеем дело с усталостью материала, где цикличность напряжений в трубах с поврежденной теплоизоляцией обеспечивается наличием переменного теплоотвода за счет движения воздушных потоков различной интенсивности, дождя, снега и др. Как и в случае суммарного действия двух факторов — стационарного и переменного во времени стоков тепла с наружной поверхности трубы, общая картина напряженного состояния стенки трубы может быть определена наложением полей напряжений, показанных на рис. 5 на напряжения рис. 7.

В случае местного стока тепла с поверхности трубы в радиусе a_0 главные значения напряжений σ_r могут быть рассчитаны по формулам [11]:

$$\sigma_r = \frac{2\alpha_r q a_0 E}{\lambda \delta r} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{A_n(z) A_n(z_0) J_1(\alpha a_0) J_1(\alpha r)}{\alpha(\alpha^2 + \gamma_n^2)} d\alpha,$$

$$\sigma_\theta = \frac{2\alpha_r q a_0 E}{\lambda \delta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n(z) A_n(z_0)}{B_n} \times$$

$$\times \int_0^{\infty} \frac{J_1(\alpha a_0)}{(\alpha^2 + \gamma_n^2)} \left[J_0(\alpha r) - \frac{J_1(\alpha r)}{\alpha r} \right] d\alpha,$$

$$A_n(z) = \delta [\gamma_n \cos(\gamma_n z) + \frac{\alpha_1}{\lambda} \sin(\gamma_n z)],$$

$$B_n = (\gamma_n \delta)^2 + \left(\frac{\alpha_1}{\lambda} \delta\right)^2 + \frac{(\gamma_n \delta)^2 - \left(\frac{\alpha_1}{\lambda} \delta\right)^2}{\gamma_n \delta} \sin(\gamma_n \delta) \cos(\gamma_n \delta) +$$

$$+ 2 \frac{\alpha_1}{\lambda} \delta \sin^2(\gamma_n \delta) \operatorname{ctg}(\gamma_n \delta) = \frac{\lambda \gamma_n}{\alpha_1},$$

где α_1 — теплоотдача с наружной поверхности трубы в месте стока тепла, Вт/(м²·К); q — мощность стока тепла, Вт/м².



Графики распределения окружных напряжений на наружной поверхности трубы представлены на рис. 8. Расчеты выполнены для $q = 4,2 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$; $a_0 = 0,05 \text{ м}$; $\lambda = 21 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\alpha_T = 11 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$; $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $\delta = 0,0381 \text{ м}$.

Выводы

1. Нарушение изоляции в процессе эксплуатации технологических трубопроводов, работающих при высоких температурах, приводит к появлению существенных, дополнительных к рабочим, температурных напряжений, что интенсифицирует процессы накопления повреждений в материале труб и может привести к преждевременному выходу из строя трубопровода за счет возникновения и развития внутренних дефектов в материале и появлению сетки трещин.

2. Мгновенные температурные напряжения, связанные с переменностью во времени температурного поля трубы, по абсолютной величине соизмеримы с напряжениями, возникающими при стационарном случае распределения тепла. Однако опасность их больше и связана с большим влиянием на процессы накопления усталостных повреждений. Отрицательное влияние переменных напряжений проявляется с течением времени, когда ударная вязкость материала трубы будет понижена до критического уровня за счет накопившихся повреждений.

3. Во избежание потери работоспособности материалов труб необходим тщательный контроль состояния их тепловой изоляции.

4. Проведенные исследования обосновывают целесообразность непрерывного мониторинга участков труб и оборудования, работающих в сложных температурных условиях.

1. *Алешин Н. П.* Оценка остаточного ресурса сварных конструкций // Сварка и Диагностика. — 2007. — № 2. — С. 4–10.
2. *Анализ причин аварийности* // Газовая промышленность. — 1989. — № 10. — С. 2–5.
3. *Бабаев А. В.* Влияние остаточных напряжений на зарождение и скорость развития усталостных трещин в свар-

ных соединениях с непроварами // Автомат. сварка. — 1977. — № 12. — С. 30–32.

4. *Березина Т. Г., Бугай Н. В., Трунин И. И.* Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок. — Киев: Техника, 1991. — 120 с.
5. *Варовин А. Я., Карзов Ю. Я., Марголин Б. З.* Проблемы прогнозирования работоспособности конструкций по данным НК // В мире неразруш. контроля. — 2006. — 4(34). — С. 6–11.
6. *Вильям Х. Мак-Адамс.* Теплопередача. — Киев: Металлургиздат, 1961. — 385 с.
7. *Акустико-эмиссионный контроль разрушения двухсекционного компенсатора в условиях малоциклового усталости* / В. А. Кобзев, С. А. Белов, М. А. Оразова, Д. Г. Рязов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 2. — С. 51–56.
8. *Оценка состояния металла труб после длительной эксплуатации в системе магистральных газопроводов* / А. А. Лебедев, С. А. Недосека, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек // Там же. — 2003. — № 2. — С. 3–8.
9. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов / АН УССР, Ин-т пробл. прочности, препринт. — Киев, 1988. — 43 с.
10. *Недосека А. Я.* Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2008. — 815 с.
11. *Недосека С. А.* Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2007. — № 2. — С. 3–8.
12. *Obodovsky B., Fedchun A., Prof. Nedoseka.* Application of a Permanent Acoustic Emission Monitoring System on Four Ammonia Storage Tanks // Ammonia Technical Manual. — 2006. — P. 23–32 (доклад на 51 Конференции американских инженеров-химиков по безопасности в аммиачном и связанном с ним производствах. — Ванкувер 11–14 сент.).
13. *Панасюк В. В.* О современных проблемах механики разрушения // Физ.-хим. механика материалов. — 1982. — № 2. — С. 7–27.
14. *Патон Б. Е., Недосека А. Я.* Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных конструкций (состояние вопроса и перспективы развития) // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1992. — № 1. — С. 3–15.
15. *Стрижало В. А., Гришко А. П., Стрельченко В. А.* Диагностика повреждений и прогнозирования предельного состояния конструкций методом акустической эмиссии // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. — 1986. — № 3. — С. 54–59.
16. *Влияние предварительного циклического нагружения на процесс разрушения образцов из мартенситностареющей стали при статическом растяжении* / Н. Г. Чаусов, А. А. Лебедев, И. О. Богинич и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 1996. — № 3. — С. 32–39.
17. *Чаусов Н. Г., Недосека С. А., Пилипенко А. П.* Комплексная оценка поврежденности пластичных материалов при различных режимах нагружения // Там же. — 2004. — № 3. — С. 16–21.