



УДК 621.12.30

## О ПУСКОВЫХ НАГРУЗКАХ ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. Я. НЕДОСЕКА, С. А. НЕДОСЕКА, доктора техн. наук, О. И. БОЙЧУК, М. А. ЯРЕМЕНКО, кандидаты техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

*Рассмотрены характер и величины температурных полей и напряжений, возникающих при внезапном приложении высокой температуры и давления к внутренней стенке трубы. На примере трубы горячего промпрегрева из стали 15X1M1Ф показан большой градиент распределения температуры и напряжений в направлении радиуса. Для целостности труб в этих случаях рекомендовано медленное повышение давления при подаче пара на внутреннюю стенку трубы.*

*Nature and magnitudes of temperature fields and stresses arising at abrupt application of high temperature and pressure to pipe inner wall are considered. A high gradient of distribution of temperature and stresses along the radius is shown in the case of hot reheating pipe from 15Kh1M1F steel. It is suggested that the influence on pipe integrity will be favourable in these cases at slower application of pressure and steam to pipe inner wall.*

Режимы пуска и остановки оборудования, работающего при высоких температурах, имеет 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, развитию или перемещению дефектов. Дефекты могут объединяться и прогрессировать. Опасность связана с количеством и «жесткостью» изменения режимов эксплуатации. С течением времени количество дефектов растет и режимы эксплуатации, а также количество наработанных оборудованием часов имеют существенное значение.

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

диаметром 630 мм, толщиной стенки 25 мм, марка материала трубы 15X1M1Ф (рис. 1). После непродолжительной остановки оборудования для обследования и выполнения ремонтных работ подают горячий пар. Быстрое открывание заслонки равносильно термоудару по холодной внутренней стенке трубы. В этом случае возникают значительные напряжения, которые и приводят к движению дефектов, а трубу с большим временем наработки могут привести к разрушению. Распределение температуры в стенке трубы можно подсчитать по известной формуле [1]:

$$\theta = \frac{q}{4\pi\lambda_0} \int_0^{t_0} \exp \left[ -\frac{(r-r_1)^2}{4at} - bt \right] \sqrt{\frac{a}{\pi r r_1}} dt, \quad (1)$$

где  $q$  — количество тепла, приложенное к стенке трубы, кал/см·с;  $\lambda_0$  — теплопроводность материала трубы, кал/см·с·°C;  $a$  — коэффициент температуропроводности материала см<sup>2</sup>/с;  $r_1$  — внутренний радиус трубы, см;  $b$  — коэффициент, характеризующий время выравнивания температуры между носителем (источником) и внутренней стенкой трубы, 1/с (коэффициент определяется экспериментально и в нашем случае равен 0,0005 1/с;  $r, t$  — радиус, см, и текущее время с.

Интеграл, взятый от 0 до  $t_0$ , показывает, что источник тепла действует в течение некоторого времени  $t_0$ .

Количество тепла, приложенное к внутренней стенке трубы при температуре 542 °C, может быть подсчитано, исходя из свойств горячего пара при давлении 3,8 МПа. Этому давлению соответствуют следующие значения теплоемкости и плотности:  $C = 19,07$  кДж/кг·°C;  $r = 3,7$  кг/м<sup>3</sup> [2]. Тогда  $\theta = Cr(\theta - \theta_0) = 19,07 \times 3,7 \times 522 = 38050$  кДж/м<sup>3</sup>

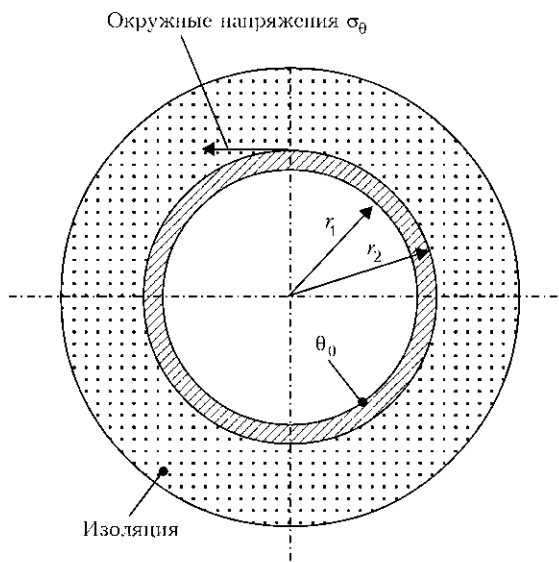


Рис. 1. Единичный элемент трубопровода с теплоизоляцией (ось  $z$  направлена перпендикулярно плоскости чертежа)

© А. Я. Недосека, С. А. Недосека, О. И. Бойчук, М. А. Яременко, 2012



или  $\theta = 9,1 \text{ кал/см}^3$  с учетом того, что начальная температура в цеху  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Учитывая поперечное сечение трубы радиусом  $29 \text{ см}$  и полагая непрерывное действие источника в течение времени  $t_0$ , а также КПД передачи тепла стенке трубы паровой смесью, для  $q$  получим следующее значение:  $q = 3772 \text{ кал/см}\cdot\text{с}$ . Формула (1) справедлива для круглой пластины бесконечных размеров по радиусу  $r$ . Однако, если рассматривать моменты времени, когда температура на наружной стенке трубы будет равна нулю (поток тепла еще не дошел до этой стенки), то можно воспользоваться этой формулой и подсчитать распределение температуры в стенке трубы в начальные моменты времени. Кроме того, отметим, что нас интересуют именно моменты, где градиент температурного поля должен быть максимальным.

Значения температур, подсчитанных по формуле (1) для различных моментов времени, представлен на рис. 2. Из графика видно, что температура в стенке трубы растет «динамично», постепенно неравномерно нагревая трубу. В первые моменты времени после подачи горячего пара неравномерность значительна (1...10 с). При этом на наружной стенке трубы температура в рамках погрешности равна нулю. Естественно при таком распределении температуры в трубе возникнут существенные напряжения, которые могут быть подсчитаны по известным формулам [3]:

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha_T E}{(1-\nu)r^2} \left( \frac{r^2 + r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} \theta r dr + \int_{r_1}^r \theta r dr - \theta r^2 \right),$$

$$\sigma_r = \frac{\alpha_T E}{(1-\nu)r^2} \left( \frac{r^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} \theta r dr - \int_{r_1}^r \theta r dr \right), \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha_T E}{(1-\nu)r^2} \left( -\theta + \frac{2}{r_1^2 - r_0^2} \int_{r_1}^{r_2} r \theta dr \right),$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu (\sigma_\theta + \sigma_z)],$$

где  $r_2$  — наружный радиус трубы;  $\alpha_T$  — коэффициент линейного расширения материала трубы,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;

$$\varepsilon_r = -\frac{\nu}{E} (\sigma_\theta + \sigma_z),$$

так как величина  $\sigma_r$  ничтожно мала.

Расчет напряжений  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_z$  показал, что они сжимающие на внутренней стенке трубы. В этом случае деформация материала трубы в направлении радиуса будет положительной растягивающей и по расчетам достигает достаточно большой величины. Кроме того, она развивается в течение ограниченного промежутка времени и носит динамический характер. Движение металла приводит

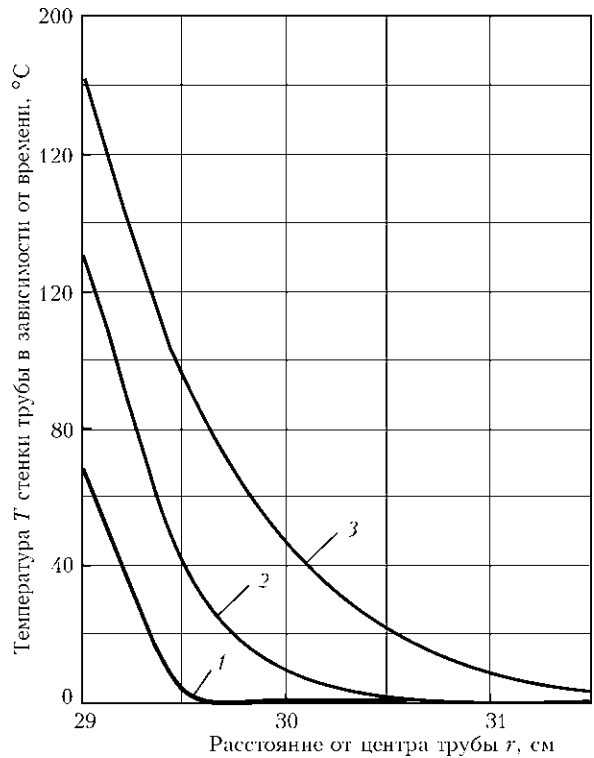


Рис. 2. Распределение температуры в стенке трубы 630×25мм из стали 15X1M1Ф: 1 — 1; 2 — 5; 3 — 10 с

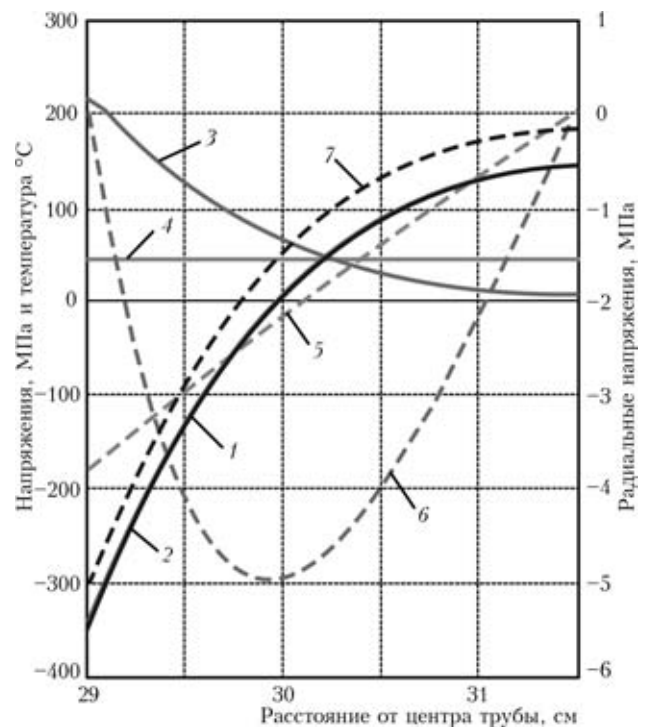


Рис. 3. Напряжения и температура в стенке трубы через 10 с после начала действия источника нагрева: 1, 2 — температурные напряжения  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_z$ , МПа; 3 — температура,  $^\circ\text{C}$ ; 4 — напряжения  $\sigma_\theta$  от внутреннего давления, МПа; 5 — суммарные напряжения  $\sigma_\theta$  от внутреннего давления и температуры; МПа; 6 — напряжения в радиальном направлении, МПа; 7 — радиальные напряжения от действия внутреннего давления, МПа



также к подвижности дефектов материала, которые в том или ином виде всегда присутствуют в нем. Динамический характер процесса может привести к негативным последствиям, особенно при многоразовых пусках и остановах объекта независимо от того, как часто это происходит. Графики распределения температурных напряжений представлены на рис. 3, из которых видно неравномерное их распределение в стенке трубы: на внутренней стенке они сжимающие и достигают значений до  $-350$  МПа, на наружной — растягивающие  $140$  МПа. Цифра условна и соответствует принятой схеме расчета и значениям физических констант материала трубы. На рис. 4 показаны напряжения от действия внутреннего давления  $3,8$  МПа. Напряжения представлены двух типов — обычные в установившемся режиме эксплуатации и динамические, связанные с внезапным приложением давления внутри трубы в пусковой период.

Как известно, при внезапном приложении нагрузки величина напряжений увеличивается в два раза [4]. В данном случае на внутренней стенке трубы они составят  $46$  и  $92$  МПа соответственно. Если динамические напряжения от действия температуры просуммировать с одноименными статическими и динамическими от действия внутреннего давления, то их сумма несколько уменьшается за счет суммирования напряжений разных знаков. Суммарные напряжения сжимающие.

Подсчет напряжений  $\sigma_z$ , действующих в направлении оси трубы, показал, что на внутренней поверхности трубы действуют также сжимающие напряжения порядка  $460$  МПа. Как видно, сами по себе напряжения не опасны, хотя и близки к пределу текучести материала. Некоторую опасность представляет положительная деформация материала трубы в направлении радиуса.

Величина деформации  $\epsilon_r$  на внутренней стенке трубы находится в пределах упругости материала  $15X1M1\Phi$  [5] и составляет  $0,104\%$ . Такая деформация, как уже было сказано, приводит к перемещению и слиянию дефектов структуры материала, особенно в случае ее динамического характера. Этот фактор необходимо учитывать при проведении пусковых работ. Если учесть интенсивность нагрева трубы действующим источником и характер развития температурных напряжений, то пуск оборудования такого типа должен проводиться в течение не менее  $15...20$  мин (рис. 3–5).

Существенное влияние на величину напряжений  $\sigma_z$  и  $\sigma_\theta$  оказывает состояние изоляции трубы. Так, если труба изолирована без дефектов в соответствие с нормативной документацией ( $\alpha = 0,00005$  кал/см<sup>2</sup>·с °С [1, 6]), то напряженное состояние практически равно нулю и температура равномерно распределена по толщине стенки. Если имеется нарушение изоляции, напри-

мер, незаполненные «рваные» участки ( $\alpha = 0,005$  кал/см<sup>2</sup>·с°С), то напряженное состояние от неравномерного распределения температуры в этом случае может достигнуть  $100$  МПа и более. Еще более неблагоприятное состояние может быть, если кроме нарушения изоляции порван или отсутствует защитный металлический кожух. За счет более интенсивного контакта трубы с окружающей средой и более интенсивного теплоотвода напряжения могут достигнуть очень большой величины. При этом, если напряжения на внутренней стенке трубы сжимающие и улучшают общую картину, то на наружной стенке они растягивающие и складываются с действующими от внутреннего давления.

Неравномерное распределение температуры в стенке трубы в начальные промежутки времени и

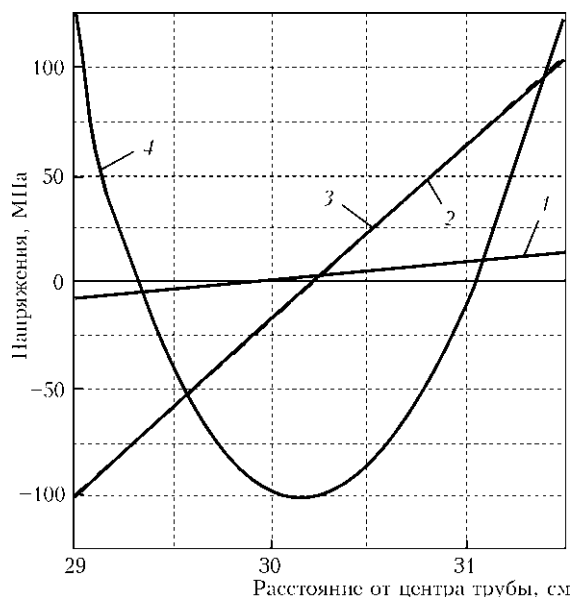


Рис. 4. Напряжения в стенке трубы через  $900$  с после начала действия источника нагрева: 1 — напряжения  $\sigma_\theta$  при  $\alpha = 0,0005$  кал/см<sup>2</sup>·с°С; 2, 3 — напряжения  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_z$  при  $\alpha = 0,005$  кал/см<sup>2</sup>·с°С; 4 — напряжения  $\sigma_r$  при  $\alpha = 0,005$  кал/см<sup>2</sup>·с°С

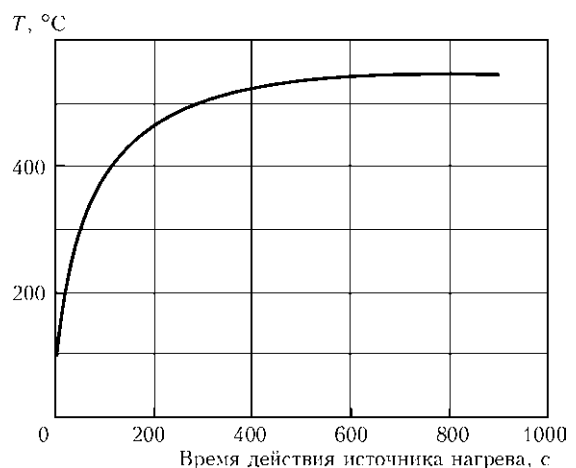


Рис. 5. Рост температуры на внутренней стенке трубы в зависимости от времени действия источника нагрева

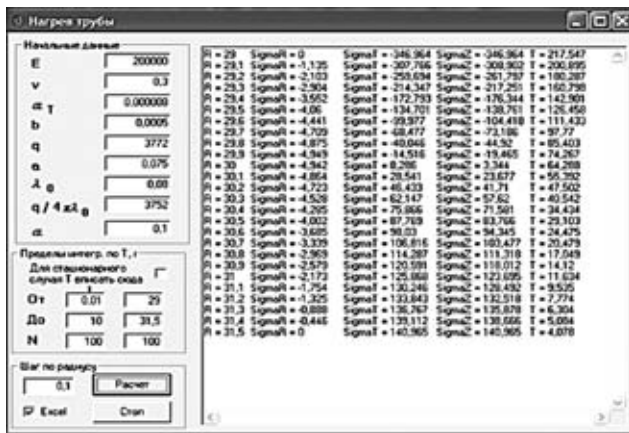


Рис. 6. Окно программы расчета температуры и напряжений по формулам (1), (2)

подвижность дефектов, вызванная температурными напряжениями, дает возможность оценить степень их опасности АЭ методом. Проанализировав полученную аппаратурой информацию, можно судить о степени опасности обнаруженных дефектов, а значит их допустимости или недопустимости.

Следует отметить, что, несмотря на кажущуюся простоту формул (2) наличие в них интегралов может привести к серьезным трудностям при расчетах, особенно, если температурное поле представлено достаточно сложным выражением (1). В этом случае расчет следует проводить по специальным программам, позволяющим сделать это быстро и без ошибок.

На рис. 6 представлено окно такой программы для подсчета температуры и напряжений в зависимости от радиуса и времени. Программа достаточно удобна и позволяет без особых трудностей получить результат. Исходные данные расчета подставляются в соответствующие поля окна программы (на рис. 6 с левой стороны), а результат счета выводится непосредственно в Excel, что дает возможность быстро проанализировать и оформлять графики в требуемом стиле и вставлять их прямо в текст отчета или статьи. Программа начинает работать при нажатии кнопки «Расчет».

## Выводы

Температурное поле в стенке трубы при внешнем температурном ударе носит динамический характер с большим градиентом распределения температуры вдоль радиуса трубы.

Высокоградиентное распределение температуры вызывает такое же распределение напряжений.

Суммарные напряжения в стенке трубы носят динамический характер в течение незначительного периода времени (в данном случае до 10 с).

В последующие периоды происходит выравнивание температуры и динамическая составляющая напряжений исчезает. Остаются незначительные сжимающие напряжения, не играющие существенного значения в ее работе.

Основной составляющей напряженного состояния становятся напряжения от действия внутреннего давления и составляют для рассматриваемого случая величину порядка 50 МПа.

Наиболее опасным периодом пуска оборудования подачей горячего пара является начальный период, когда появляются и развиваются существенные деформации материала в направлении радиуса трубы. Эти деформации достигают значения, превышающего в два раза предел текучести данного материала. И хотя этот период достаточно мал, но этого может быть достаточно, чтобы вывести из строя трубу или послужить источником новых дефектов. Гарантированный пусковой период труб в эксплуатацию должен быть не менее 15...20 мин.

Возникающее при пуске оборудования температурное поле и напряжения могут быть использованы при оценке состояния материала трубы с помощью метода акустической эмиссии.

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Индпром, 2008. — 815 с.
2. Свойства насыщенного водяного пара от 0 до 100 бар. www.dpva.info.
3. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. — Киев: Наука, 1975. — 576 с.
4. Писаренко Г. С., Уманский Э. С. и др. Сопротивление материалов. — Киев: Выща шк., 1986. — 776 с.
5. Сталь и сплавы. www.splav.kharkov.com.
6. Мак-Адамс В. Теплопередача. — М.: Metallurgizdat, 1961. — 278 с.

Поступила в редакцию  
02.06.2012