

$$V_{1-2} = 6086 \times 10 = 6700 \text{ м}^3; \quad V_{2-3} = 3858 \times 10 = 38580 \text{ м}^3;$$
$$V_{3-4} = 2526 \times 10 = 25260 \text{ м}^3; \quad V_{4-5} = 670 \times 10 = 6700 \text{ м}^3.$$

Таким образом, объем водохранилища равен:

$$\Sigma = V_{1-2} + V_{2-3} + V_{3-4} + V_{4-5} = 131400 \text{ м}^3.$$

Подобные расчеты позволяют с достаточной точностью определить объем пространственного тела незакономерной формы.

Приведенные выше примеры могут быть использованы при проектировании гористого рельефа местности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Короев Ю. И.* Начертательная геометрия. М.: Кнорус, 2011.
2. Инженерная геодезия: учебник для вузов / под ред. Д. Ш. Михеева; М.: М-во образования РФ, 2008.



УДК 620.19

### **ВЛИЯНИЕ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ СЖАТОГО ГАЗА НА СТРЕСС-КОРРОЗИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ\***

Асп. *Хабалов Г. И.*,  
асп. *Дзуцев Т. М.*,  
асп. *Абаев З. К.*,  
асп. *Дзарукаев Э. В.*

Северо-Кавказский горно-металлургический институт  
(Государственный технологический университет)  
г. Владикавказ, РСО-Алания, Россия

*Проведенные исследования посвящены моделированию процессов развития поверхностных трещин в стенках газонефтепроводов в зависимости от запаса упругой энергии газа.*

---

\* Результаты работы получены при поддержке проекта № 2313 “Развитие методов оценки склонности металла труб магистральных газопроводов стресс-коррозионной повреждаемости и разработка мероприятий по снижению риска техногенных аварий”, выполняемого в рамках государственного задания № 2014/207.

Одним из важнейших и нерешенных вопросов в системе газонефтепроводов остается отсутствие стресс-коррозии на нефтепроводах, хотя условия их эксплуатации не отличаются от газопроводов? Этот вопрос многих исследователей приводил к выводу, что причина стресс-коррозии находится в перекачиваемом продукте – природном газе.

Известно, что с увеличением запаса упругой энергии (ЗУЭ) усложняются условия работы металла в конструкции: снижается сопротивление разрушению, уменьшаются критическая длина трещины, способной к самопроизвольному развитию, и коэффициент интенсивности напряжений.

В момент образования трещины в металле трубы запасенная упругая энергия практически мгновенно подводится в зону разрушения и способствует его распространению [1].

Преобладающее количество дефектов стресс-коррозии в абсолютном исчислении – 89 % от общего числа выявленных, наблюдается на газопроводах  $\varnothing$  1220, 1420 мм. Они аккумулируют большое количество упругой энергии перекачиваемого продукта, а также энергии упругой деформации стенки трубопровода и представляют большую опасность вследствие коррозионного и стресс-коррозионного разрушения.

Запас упругой энергии газа зависит от диаметра трубы, ее жесткости, величины давления газа, поэтому исследование влияния ЗУЭ газа на коррозионные и стресс-коррозионные разрушения трубопроводов является важным. Повышение ЗУЭ в газопроводе способствует накоплению повреждений и стимулирует процессы КРН.

Удельная упругая энергия сжатого газа на единицу длины трубопровода определяется по формуле:

$$U_{\Gamma} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot P \ln \frac{P}{P_a}, \quad (1)$$

где  $P$  – давление газа в трубе,  
 $P_a$  – атмосферное давление,  
 $d$  – диаметр трубы.

Энергия в нефтепроводе состоит из двух частей. Одна часть определяется упругими свойствами нефти, вторая – гидростатическим давлением:

$$U_{H1} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{P^2}{2E} \quad (2)$$

и

$$U_{H2} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot P, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости (Юнга) жидкости (модуль объемного сжатия), численно равный  $1,35 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup> [2].

При диаметре трубы  $d = 1420$  мм,  $P = 70 \cdot 10^5$  Па отношение  $\frac{U_{H1}}{U_H} \approx 0,002$ , следовательно, потенциальная энергия нефти в нефтепроводе определяется по формуле:

$$U_H \approx U_{H2} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot P. \quad (4)$$

На рис. 1 представлена зависимость отношений удельных упругих энергий газа и нефти (при одинаковом объеме продуктов) от давления при диаметре  $d = 1420$  мм и толщине стенки трубы 15,7 мм.

Из приведенной зависимости видно, что при  $\frac{P}{P_a} = 70$  удельная энергия газа в 4,25 раза больше, чем в нефтепроводе.

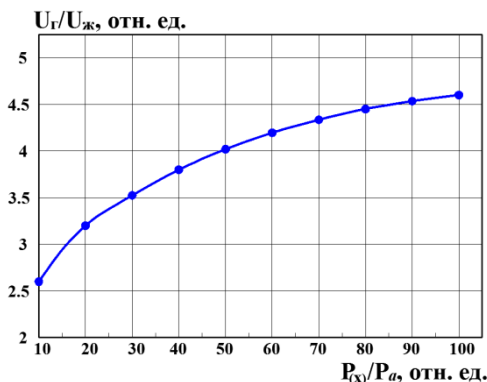


Рис. 1. Зависимость отношения удельных потенциальных энергий газа и жидкости от относительного давления в трубопроводах.

Процесс развития поверхностной трещины представим в виде модели, состоящей из двух последовательно соединенных пружин (рис. 2).

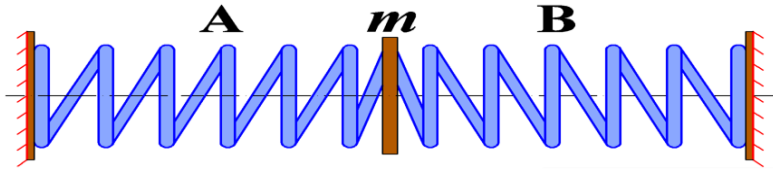


Рис. 2. Модель влияния запаса упругой энергии сжатого газа на развитие повреждений в стенке газопровода.

Пружина «А» имитирует упругие свойства сжатого газа, а пружина «В» – упругие свойства стенки и развитие трещины в стенке.

В месте контакта этих пружин сосредоточим фиктивную массу  $m$ . Колебательное движение массы  $m$  описывается дифференциальным уравнением второго порядка [3]:

$$m \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \mu \frac{dx_1}{dt} + (k_1 + k_0)x_1 = k_1 x_0, \quad (5)$$

где  $x_1(t)$  – перемещение массы  $m$ ;  $\mu$  – коэффициент внутреннего (вязкого) сопротивления;  $k_1$  – жесткость пружины «А»;  $k_0$  – жесткость пружины «В»;  $x_0$  – величина сжатия пружины «А», численное выражение которого определяется из выражения:

$$k_1 \frac{x_0^2}{2} = \Delta U_r; \quad (6)$$

$$x_0 = \sqrt{\frac{2\Delta U_r}{k_1}}. \quad (7)$$

Слагаемые  $m \frac{d^2 x_1}{dt^2}$  и  $\mu \frac{dx_1}{dt}$  представляют силу инерции и силу внутреннего сопротивления с противоположными знаками. Слагаемое  $(k_1 + k_0)x_1$  – это восстанавливающая сила, обусловленная пружинами «А» и «В» с жесткостями  $k_1$  и  $k_0$ . Правая часть уравнения (5)  $k_1 x_0$  представляет собой действующую постоянную силу на массу  $m$ , обусловленную сжатием пружины «А». При этом потенциальная энергия сжатой пружины «А» должна равняться удельной упругой энергии сжатого газа, сосредоточенной на трещине-дефекте.

В формуле (6) левая часть представляет потенциальную энергию сжатой пружины. Пружина «А» сжата на величину  $x_0$ .

Правая часть формулы (6) представляет часть удельной потенциальной энергии сжатого газа, которая непосредственно сосредоточена на площади трещины-выемки.

Решение дифференциального уравнения (5) с нулевыми начальными условиями при  $x_1(t)=0$ ; при  $t = 0$  имеет следующий вид:

$$x_1(t) = -e^{-\frac{\mu}{2m}t} \left( \frac{\mu}{2m\lambda} \frac{k_1 x_0}{k_1 + k_0} \sin \lambda t + \frac{k_1 x_0}{k_1 + k_0} \cos \lambda t \right) + \frac{k_1 x_0}{k_1 + k_0}, \quad (8)$$

где

$$\lambda = \sqrt{\left( \frac{k_1 + k_0}{m} \right)^2 - \frac{\mu^2}{4m^2}}. \quad (9)$$

При  $t \rightarrow \infty$  формула (8) асимптотически приближается к следующей формуле:

$$x_1 = \frac{k_1 x_0}{k_1 + k_0}. \quad (10)$$

Вычислим часть объема трубы, занятую газом, которая сосредоточена на трещине-дефекте. Для этого выделим трехгранную призму в круге с диаметром  $d_2$  и высотой  $2l$  (рис. 3).

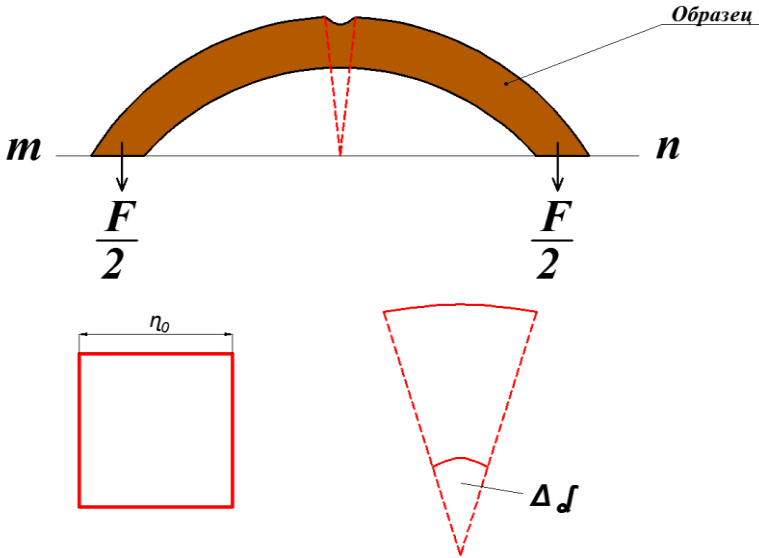


Рис. 3. Призма объема газа, приходящегося на дефект.

Объем этой призмы равен:

$$W = \frac{d_2 l \eta_1}{2}, \quad (11)$$

где  $d_2$  – внутренний диаметр трубопровода,  $l$  – полудлина трещины,  $\eta_1$  – раскрытие берегов трещины. Этот объем сжатого газа сосредоточен на выемке-трещине.

Вычислим часть удельной упругой энергии газа, которая содержится в объеме  $W$ ,

$$\Delta U_2 = W \bar{U}_2, \quad (12)$$

где  $\bar{U}_z$  – часть удельной упругой энергии газа, которая содержится в единице объема, которая равна:

$$\bar{U}_z = \frac{4U_r}{\pi d_2^2} = P \ln \frac{P}{P_a}. \quad (13)$$

Подставим значения  $W$  и  $\bar{U}_z$  из (8) и (10) в (9), получим количество упругой энергии сжатого газа сосредоточенного непосредственно на дефекте трубопровода:

$$\Delta U_z = \frac{d_2 l \eta_l}{2} P \ln \frac{P}{P_a}. \quad (14)$$

В литературном источнике [4] приведен справочный научный материал по растяжению и изгибу балки с несквозной поверхностной трещиной полуэллиптического профиля. Напряженно-деформированное состояние балки в этой задаче наиболее близко подходит к состоянию в трубопроводе с высоким давлением.

Для этой задачи получены формулы, определяющие предельные нагрузки для несквозных трещин при наличии стабильного подрастания:

Растяжение:

$$\sigma = \frac{Pd_2}{2(h-a)} = (0,68 \pm 0,04) \frac{k_{1,c}}{\sqrt{a}} \quad \text{при } 0 < \frac{a}{h} < 0,4, \quad (15)$$

где  $h$  – толщина стенки трубопровода,  $a$  – глубина трещины,  $k_{1,c}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений для данного типа металла.

Изгиб:

$$M = 0,12 k_{1,c} h^2 f \frac{1}{\sqrt{a}} \quad \text{при } 0 < \frac{a}{h} < 0,4, \quad (16)$$

$$f = \begin{cases} 1,1 \pm 0,1 & \text{при } 0 < \frac{a}{h} < 0,1, \\ 1,1 - 1,2 \frac{a}{h} \pm 1 & \text{при } 0,1 < \frac{a}{h} < 0,4. \end{cases} \quad (17)$$

Проинтегрируем обе части выражения (12) по переменной  $a$  в пределах  $(0; 0,4h)$  (при условии  $k_{1,C} = \text{const}$ ).

$$\frac{Pd_2}{2} \ln \frac{5}{3} = 0,68k_{1,C} 2\sqrt{0,4}\sqrt{h}. \quad (18)$$

Из этого выражения получается значение  $k_{1,C}$ :

$$k_{1,C} = 0,3 \frac{Pd_2}{\sqrt{h}}. \quad (19)$$

Теперь вычислим  $k_1$  и  $k_0$ . По закону Бойля-Мариотта имеет место равенство:

$$\begin{aligned} P(x)x &= (P(x) + \Delta P)(x - \Delta x), \\ P(x)x &\approx P(x)x + \Delta Px - P(x) \cdot \Delta x. \end{aligned} \quad (20)$$

Из этого выражения определим  $\Delta P$ :

$$\Delta P = \frac{P(x)}{x} \Delta x.$$

При  $x = 1$   $\Delta P = P(x) \cdot \Delta x$ .

Следовательно, коэффициент жесткости пружины  $A$  (рис. 2) равен:

$$k_1 = P \cdot 1\text{м}. \quad (21)$$



Для вычисления жесткости корпуса трубы надо воспользоваться формулой (12). Придадим величинам  $\frac{Pd_2}{2}$  и  $a$  приращения:

$$F = \frac{Pd_2}{2}; \quad F + \Delta F = 0,68 \frac{h-a-\Delta a}{\sqrt{a+\Delta a}} k_{1,C}. \quad (22)$$

Выполним линеаризацию этой формулы:

$$F + \Delta F = 0,68 k_{1,C} \frac{(h-a-\Delta a)\sqrt{a}\sqrt{1-\frac{\Delta a}{a}}}{a} = 0,68 k_{1,C} \left( \frac{h-a}{\sqrt{a}} - \left( \frac{h-a}{2a\sqrt{a}} + \frac{1}{\sqrt{a}} \right) \Delta a \right).$$

Следовательно, жесткость корпуса трубы, содержащей трещину, равна:

$$k_0 = \left( \frac{h-a}{2a\sqrt{a}} + \frac{1}{\sqrt{a}} \right) \cdot 0,68 \cdot k_{1,C}. \quad (23)$$

В литературном источнике [5] доказано утверждение о том, что если длина увеличивается, то происходит освобождение потенциальной энергии. Если половина длины  $l$  увеличилась на  $\Delta l$ , то будет иметь место следующая формула:

$$\Delta U_r^* = \frac{4k_{1,C}^2}{3E} \Delta l, \quad (24)$$

где  $\Delta U_r^*$  – часть удельной потенциальной энергии, которая передается стенке трубы. Эта часть энергии равна:

$$\Delta U_r^* = k_0 \frac{x_1^2}{2}, \quad (25)$$

где  $x_1$  определяется по формуле (10):

$$x_1 = \frac{k_1 x_0}{k_1 + k_0}. \quad (26)$$

Значение  $x_0$  – начальное сжатие пружины «А», определяется следующими соображениями. Пружина «А», сжатая на величину  $x_0$ , содержит потенциальную энергию, равную  $k_1 \frac{x_0^2}{2}$ .

Эта часть энергии сосредоточена непосредственно на дефекте – трещине:

$$\Delta U_{r1} = k_1 \frac{x_0^2}{2}, \quad (27)$$

$$\Delta U_{r1} = \Delta U_r = \frac{d_2 l \eta_1}{2} P \ln \frac{P}{P_a}.$$

Подставив значения  $x_1$  и  $x_0$  из (26) и (27) в (24), получим:

$$U_r^* = \frac{k_0}{2} \frac{k_1^2 x_0^2}{(k_1 + k_0)^2} = \frac{k_1 x_0^2}{2} \frac{k_0 k_1}{(k_1 + k_0)^2}, \quad (28)$$

$$U_r^* = \frac{d_2 l \eta_1}{2} P \ln \frac{P}{P_a} * \frac{k_0 k_1}{(k_0 + k_1)^2}. \quad (29)$$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что они могут быть использованы при моделировании процессов развития одиночных полуэллиптических трещин в стенках магистральных газонефтепроводов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анучкин М. П., Горицкий В. Н., Мирошниченко Б. И. Трубы для магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1986. С. 19.
2. Повх И. Л. Техническая гидромеханика. Л.: Машиностроение, 1969.
3. Гутер Р. С., Янпольский А. Р. Дифференциальные уравнения. М.: Высшая школа, 1976.

4. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.

5. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 711 с.



УДК 620.19

## СТРЕСС-КОРРОЗИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ\*

Асп. *Хабалов Г. И.*,

асп. *Дзуцев Т. М.*,

канд. техн. наук *Алборов А. Д.*,

асп. *Дзарукаев Э. В.*

Северо-Кавказский горно-металлургический институт  
(государственный технологический институт),  
г. Владикавказ, РСО-Алания, Россия

*Статья посвящена изучению и моделированию развития стресс-коррозионных дефектов на магистральных газопроводах, которые являются основными причинами аварий на газопроводах диаметром 1220, 1420 мм.*

Газовая промышленность – крупнейший элемент российской экономики и мировой системы энергообеспечения. Россия занимает первое место в мире по добыче, запасам и ресурсам газа, обеспечивает свыше 21 % его мирового производства и около 25 % всех международных поставок.

Трубопроводный транспорт является одним из самых экономичных способов передачи жидких и газообразных продуктов на дальние расстояния с минимальными потерями продукта в процессе доставки его потребителям, что делает его наиболее важным и эффективным в системе мировой экономики. Магистральные газонефтепроводы, как и все сложные технические системы, имеют свои особенности и проблемы.

---

\* Результаты работы получены при поддержке проекта № 2313 “Развитие методов оценки склонности металла труб магистральных газопроводов стресс-коррозионной повреждаемости и разработка мероприятий по снижению риска техногенных аварий”, выполняемого в рамках государственного задания № 2014/207.