

УДК 539.4

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИНЫ И СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ СРЕДЫ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ «ТЕЧЬ ПЕРЕД РАЗРУШЕНИЕМ» ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС**

**И.В. Орыняк, Е.С. Яковлева, Я.Р. Дубик**

*ООО «ИПП-Центр», г. Киев*

Площадь раскрытия сквозной трещины (ПРТ) в трубе и скорость истечения теплоносителя являются одними из основных расчетных параметров при применении концепции «течь перед разрушением». Существующие подходы определения ПРТ основаны на методе энергии для постоянной нагрузки, разработанном Сандерсом. В работе на основе комбинированного метода весовых функций предлагается приближенное выражение для фундаментального поля перемещений при действии сосредоточенной силы на берега трещины в оболочке. На его основе получены формулы для нахождения площади раскрытия трещины в полиномиальном поле напряжений. Для цилиндрической оболочки с продольной и поперечной трещинами проведено сравнение полученных величин площади с литературными результатами. При определении скорости истечения, в отличие от подходов, использующих упрощающие приемы для описания двухфазного течения, например, модель Генри-Фауске, предложена модель на основании дифференциального уравнения для одномерного гомогенного двухфазного течения

### **Введение**

На начальной стадии развития сквозные трещины в трубопроводах высокого давления находятся в стабильном состоянии течи перед разрушением (ТПР). ТПР методологии направлены на выявление течи, пока трещина стабильна, что дает возможность принять меры для предотвращения разрушения трубопроводной системы.

Одним из важнейших параметров такого анализа является расход жидкости при ее истечении из трещины. Размер трещины и скорость истечения теплоносителя являются основными параметрами определения этого показателя. Основную роль в определении размера трещины играет площадь раскрытия трещины (crack opening area).

Самыми распространенными методами определения площади раскрытия трещины (ПРТ) являются методы, основанные на независимом от пути интегрирования интеграле для скорости освобождения энергии, полученного Сандерсом. В дальнейшем им были получены решения для КИН на основании выражения скорости освобождения энергии для длинной окружной трещины при действии осевого растяжения, а также растяжения и изгиба соответственно, которые были использованы многими учеными в своих методах определения площади раскрытия трещины. Эти методы основывались на предположении, что приложенные напряжения постоянны ( $\sigma = \text{const}$ ). Так, в 1983 году Тада и Пэрис [1] на основе решений Сандерса предложили полиномиальные выражения для безразмерных КИН для окружной трещины в цилиндрической оболочке в случае действия растяжения и изгиба. В 1986 году Кастнером с соавторами [2] были предложены аппроксимационные формулы для безразмерной ПРТ для продольной и окружной трещины в цилиндре в зависимости от параметра кривизны.

Вышеизложенные методы определения ПРТ разработаны для случая действия однородной нагрузки, что ограничивает область их применения. В данной работе на основе применения метода весовых функций [3] предлагается простая процедура определения площади раскрытия трещины в полиномиальном поле напряжений.

Другой основной параметр, определяющий расход теплоносителя, – скорость истечения – характеризуется потерей давления на входе и на выходе из трещины, определение которой является основной задачей. Многие исследователи используют упрощенные модели определения скорости истечения, основанные на уравнении для потери давления типа Бернулли.

На самом деле истечение из сквозной трещины – это сложная гидродинамическая задача. Одним из основных ее параметров является такая характеристика, как двухфазное течение. Так, в руководстве [6] любые исследования второго и третьего уровней предполагают определение расхода с использованием специальных программ SQUIRT или PICER. Основой этих программ является модель критического гомогенного термонеуравновешенного течения (например, модели Генри [7]) с учетом морфологии трещины. В данной работе предложена модель на основании дифференциального уравнения для одномерного гомогенного двухфазного течения [9].

### Постановка цели и задач исследования

Целью исследования является решение задачи определения площади раскрытия трещины на основе применения метода весовых функций для случая приложения произвольной нагрузки к ее берегам. Численно решая дифференциальное уравнение одномерного гомогенного течения перегретой жидкости, определяют параметры критического истечения теплоносителя.

Для достижения поставленной цели решаются задачи:

- представление перемещения в виде суммы фундаментальных перемещений для плоского тела и добавочного слагаемого заданного вида с неизвестным коэффициентом, подлежащим определению;
- на основе комбинированного метода весовых функций [3] получение соотношения между указанными неизвестными коэффициентами и значениями безразмерных КИН;
- конкретизация полученных результатов на случай полиномиального поля напряжений и получение удобной формулы для ПРТ;
- проведение сравнения полученных величин ПРТ в цилиндрической оболочке с результатами, представленными в литературе;
- на основе численного решения дифференциального уравнения для двухфазного потока определение параметров критического истечения теплоносителя из сквозной трещины.

### Методы определения площади раскрытия трещины

*Подходы определения ПРТ, основанные на методе баланса энергии при однородном нагружении*

При однородном нагружении берегов трещины (обычно используется принцип суперпозиции, в соответствии с которым к берегам трещины прикладываются напряжения, которые бы существовали в этом сечении при отсутствии трещины) для определения площади  $A$  часто используется метод, основанный на балансе энергии для упругого тела. С одной стороны, потенциальная энергия равна интегралу от произведения напряжений  $S$  на перемещения  $u$  по длине трещины  $a$ , а с другой, производная от энергии по длине трещины пропорциональна квадрату от коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$ .

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_{-a}^a s(x)u(x)dx \quad \text{и} \quad \frac{\partial \Pi}{\partial a} = \frac{K_1^2}{E}. \quad (1)$$

Выражения для КИН широко представлены в литературе и записываются в виде

$$K_1 = s \sqrt{pa} F_1(a, \mathbf{\Gamma}), \quad (2)$$

где  $\mathbf{\Gamma}$  – набор безразмерных геометрических параметров, характеризующих геометрию тела и трещины;

$F_1(a, \mathbf{\Gamma})$  – протабулированные безразмерные КИН.

При однородном нагружении выражение (1) может быть представлено в виде

$$\Pi = 0,5s \cdot A. \quad (3)$$

Интегрируя выражение (1) по  $a$  с учетом (2) и сопоставляя с (3), получим выражения вида

$$A = \frac{2sp}{E} \int_{-a}^a x (F_1(x, \mathbf{\Gamma}))^2 dx = \frac{2spa^2}{E} \cdot \left( \int_{-1}^1 t (F_1(t, \mathbf{\Gamma}))^2 dt \right) = A_0 \cdot Z(\mathbf{\Gamma}), \quad (4)$$

где  $Z(\mathbf{\Gamma})$  – безразмерная площадь раскрытия трещины, определяет влияние особенностей конкретной геометрии тела и трещины на расчетные значения площади раскрытия трещины;

$A_0 = 2s/E a^2$  – площадь раскрытия трещины пластины Гриффитса.

*Подходы определения ПРТ, основанные на методе Тада – Пэриса*

Свой метод Тада и Пэрис разработали для отношения  $R_m/t = 10$ . Выражения КИН, предложенные Тада и Пэрисом, имеют вид [1]

$$F_t = 1 + 7,5 \left( \frac{q}{p} \right)^{3/2} - 15 \left( \frac{q}{p} \right)^{5/2} + 33 \left( \frac{q}{p} \right)^{7/2}$$

$$F_b = 1 + 6,8 \left( \frac{q}{p} \right)^{3/2} - 13,6 \left( \frac{q}{p} \right)^{5/2} + 20 \left( \frac{q}{p} \right)^{7/2}$$

Здесь индекс «t» означает растяжение, а «b» – изгиб. В случае действия однородного растяжения безразмерная ПРТ имеет вид

$$Z_t = \left[ \begin{aligned} & 1 + \left( \frac{q}{p} \right)^{1,5} \left\{ 8,6 - 13,3 \left( \frac{q}{p} \right) + 24 \left( \frac{q}{p} \right)^2 \right\} + \\ & + \left( \frac{q}{p} \right)^3 \left\{ 22,5 - 75 \left( \frac{q}{p} \right) + 205,7 \left( \frac{q}{p} \right)^2 - 247,5 \left( \frac{q}{p} \right)^3 + 242 \left( \frac{q}{p} \right)^4 \right\} \end{aligned} \right]. \quad (5)$$

Для случая действия изгибных напряжений предложена эмпирическая формула для безразмерной ПРТ

$$Z_b = \frac{3 + \cos q}{4} Z_t. \quad (6)$$

Для внутреннего давления выражение для КИН зависит от параметра геометрии  $r = a/\sqrt{Rt} = q\sqrt{R/t}$  как для продольной, так и для осесимметричной трещины. Для осесимметричной трещины, нагруженной внутренним давлением  $p$ ,

$$F_p = \begin{cases} (1 + 0,3225r^2) & 0 \leq r \leq 1 \\ 0,9 + 0,25r & 1 \leq r \leq 5 \end{cases},$$

$$Z_p(r) = \begin{cases} r^2(1 + 0,16125r^2) & 0 \leq r \leq 1 \\ 0,02 + r^2(0,81 + 0,3r + 0,03125r^2) & 1 \leq r \leq 5 \end{cases}.$$

Кастнер с соавторами [2] предложил выражение для безразмерной ПРТ для окружной и продольной трещин в цилиндрической оболочке в зависимости от параметра кривизны  $I = [12(1 - n^2)]^{1/4} a/(Rt)^{1/2}$ . Для окружной трещины

$$Z(I) = (1 + 0,117I^2)^{1/2}$$

и для продольной:

$$Z(I) = 1 + 0,1I + 0,16I^2. \tag{7}$$

*Определение ПРТ в случае произвольного нагружения берегов трещины*

Рассмотренные в предыдущем параграфе методы разработаны для случая однородного нагружения. Нами предложен подход по определению ПРТ для случая произвольной полиномиальной нагрузки. Он основан на применении метода весовых функций и КИН, предложенного в работе [3], для нахождения приближенных фундаментальных перемещений берегов трещин.

Для единичной точечной силы, приложенной к противоположным берегам трещины в пластинке Гриффитса на расстоянии  $X$  от центра трещины длиной  $2a$ , согласно фундаментальному решению теории упругости, перемещения даются формулой [4]

$$U_0(a, x, x) = \frac{2P}{pE} \ln \frac{a^2 - xX + \sqrt{(a^2 - x^2)(a^2 - X^2)}}{a^2 - xX - \sqrt{(a^2 - x^2)(a^2 - X^2)}}, \tag{8}$$

При произвольном законе изменения нагрузки  $S(x)$  искомые перемещения получаются интегрированием выражения (8):

$$u(x) = \int_{-a}^a S(x) \cdot U_1(a, x, x) dx. \tag{9}$$

Площадь раскрытия получается интегрированием полученных перемещений. Для произвольной геометрии возможно применение комбинированного метода весовых функций, основанного на поиске приближенных фундаментальных выражений для поля перемещений:

$$U_1(a, x, x) = U_0(a, x, x) + C \frac{\sqrt{(a^2 - x^2)(a^2 - X^2)}}{a^2}, \tag{10}$$

где константа  $C$  находится путем сопоставления решения для КИН для заданной геометрии и однородного нагружения. Детально метод описан в работе [3]. Величина КИН находится из соотношения

$$K_I = \lim_{x \rightarrow a} \frac{u(x)E\sqrt{p}}{\sqrt{2x4}}. \quad (11)$$

Тогда из формул (9) и (11) получаем

$$K_I = \int_{-a}^a h(x, \mathbf{r}, \mathbf{G}) s(x) dx, \quad (12)$$

где  $h(x, \mathbf{r}, \mathbf{G})$  – так называемая весовая функция,

$\mathbf{G}$  – набор констант, характеризующих геометрию.

Краевая задача теории упругости, по определению КИН, сводится с ее помощью к простому интегрированию по длине трещины.

Вид функции  $h(x, \mathbf{r}, \mathbf{G})$

$$h(x, \mathbf{r}, \mathbf{G}) = \frac{\sqrt{a+x}}{\sqrt{pa}\sqrt{a-x}} (1 + C(a-x)/a). \quad (13)$$

Согласно методу весовых функций,  $C$  находится следующим образом: по известной формуле (2) определяется КИН для заданной геометрии при однородном нагружении, подставляем (13) в (12):

$$K_I = s\sqrt{pa}(1 + C/4). \quad (14)$$

Сопоставим выражения (2) и (14) и получим выражение для  $C$ :

$$C(a, \mathbf{r}, \mathbf{G}) = 4(F_I(a, \mathbf{r}, \mathbf{G}) - 1).$$

Таким образом, все, что нам теперь необходимо, это найти в литературе значения безразмерных КИН при соответствующих условиях нагружения.

Интегрируем по частям выражение (9) с учетом формулы для перемещений (10) и получаем

$$u(x) = \int_{-a}^a U_1(x) \cdot dV(x) = U_1(x) \cdot V(x) \Big|_{-a}^a - \int_{-a}^a V(x) \cdot dU_1(x),$$

где  $s(x)dx = dV(x)$  и  $dU_1(x) = \frac{4s_p}{pE} \frac{\sqrt{a^2 - x^2}}{\sqrt{a^2 - x^2}} \left( \frac{1}{x-x} - \frac{x}{a^2} C \right) dx$ .

Рассмотрим некоторые типовые законы нагружения:

а)  $s = (x/a)^0$ ,  $V(x) = x$ ,  $u(x) = 4\sqrt{a^2 - x^2} \frac{s_p}{E} \left( 1 + \frac{C}{2} \right)$ ;

$$A^{(0)} = A_0 \left( 1 + \frac{C}{2} \right); \quad (15)$$

$$\text{б) } s = (x/a)^1, V(x) = x^2/2a, \quad u(x) = 2 \frac{S_p}{E} \frac{x}{a} \sqrt{a^2 - x^2};$$

$$A^{(1)} = 0;$$

$$\text{в) } s = (x/a)^2, V(x) = x^3/3a^2, \quad u(x) = \frac{S_p}{E} \sqrt{a^2 - x^2} \left( \frac{2}{3} + \frac{4x^2}{3a^2} + \frac{C}{2} \right);$$

$$A^{(2)} = \frac{pa^2 S_p}{2E} \left( 1 + \frac{C}{2} \right). \quad (16)$$

#### Проверка полученных результатов

Сравним полученные нами результаты с опубликованными в литературе. Формулу (4) с учетом (5) – безразмерной ПРТ Тада – Периса для окружной трещины представим в виде

$$A_t = A_0(1 + \Delta). \quad (17)$$

Полученная нами формула (15) для площади раскрытия трещины при действии однородной растягивающей нагрузки тоже имеет вид (17), где

$$\Delta = C/2. \quad (18)$$

Значения безразмерных КИН возьмем из работы Эродогана (табл.) [5].

#### Т а б л и ц а

**Значения КИН для осевой трещины в цилиндре под действием мембранных напряжений**

$I$	Окружная трещина	Продольная трещина	
	$C_m$	$A_e$	$a_e$
0,2	–	1,0096	0,006161
1	1,0439	1,1993	0,05283
2	1,1496	1,6177	0,1033
3	1,2847	2,1035	0,141
4	1,429	2,5999	0,1691
5	1,5715	3,0895	0,1903

Для продольной трещины в цилиндрической оболочке, согласно Кастнеру [2], выражение безразмерной ПРТ (7) тоже запишем в виде (17), где выражение для добавочной ПРТ

$$\Delta_K = 0,1I + 0,16I^2. \quad (19)$$

На рис. 1, а представлены зависимости добавочных ПРТ, полученных по нашей формуле (18) и по формуле Кастнера (19), а на рис. 1, б - по нашей формуле (18) и по формуле (5), предложенной Тада и Пэрисом, в зависимости от параметра кривизны  $I$  и для значения  $R_m/t = 9,461$  [6]. Как видно из рисунков, имеем хорошее согласие результатов.

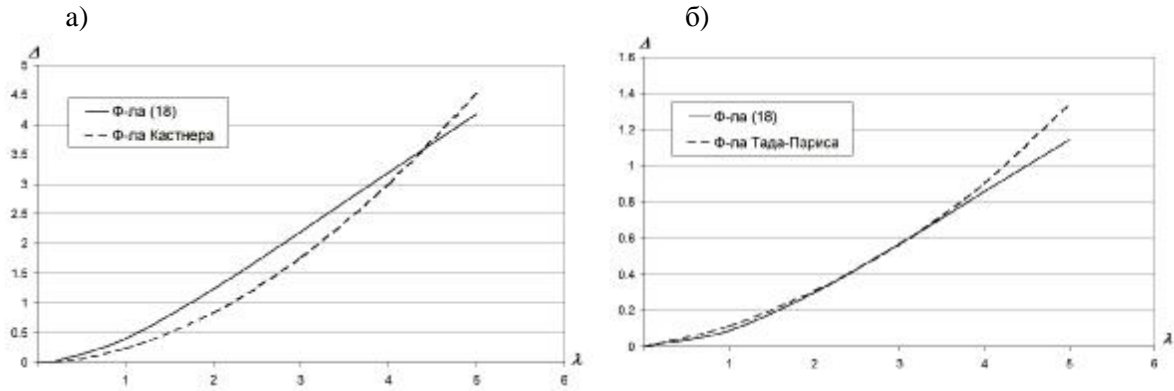


Рис. 1. Значения добавочных площадей  $\Delta_*$  в зависимости от параметра кривизны  $l$  :  
а – продольная трещина; б – окружная

В случае действия изгибных напряжений в работе [1] предложено приближенное выражение для площади раскрытия трещины в виде

$$A_b = 2pa^2 \frac{S_b}{E} Z_b, \quad (20)$$

где формула для  $Z_b$  дается выражением (6)

$$Z_b(q) = \frac{3 + \cos q}{4} Z_t \approx (1 - q^2/8) I_t. \quad (21)$$

Подставляя выражения (17) и (20) в (21), получаем

$$A_b = pa^2 \frac{S_b}{E} (1 + \Delta) (1 - q^2/8). \quad (22)$$

С другой стороны, распределение напряжений по сечению цилиндра-балки дается следующей формулой:

$$s(q) = s_b \cos j \approx s_b (1 - j^2/2) = s_b (1 - 0,5(x/a)^2 (a/R)^2).$$

Здесь  $j$  обозначает текущую угловую координату, отсчитываемую как  $q$  и  $j = x/R$ . То есть нагрузка представляется как сумма двух компонент – однородной и квадратичной. С учетом выражений (15) и (16) получаем

$$A_b = A^{(0)} - 0,25A^{(0)} \cdot 0,5(a/R)^2 = pl^2 \frac{S_b}{E} (1 + \Delta) (1 - (a/R)^2/8). \quad (23)$$

Сравнивая выражения (22) и (23), видим, что результат совпадает, что представляет-ся интересным аналитическим подтверждением эмпирической формулы Гада – Пэриса.

### Определение скорости истечения

Истечение жидкости измеряется таким параметром, как расход  $Q$  (кг/с). Формула для расхода имеет вид

$$Q = AG,$$

где  $A$  – площадь раскрытия трещины,  $m^2$ ;

$G$  – массовая скорость истечения,  $kg/m^2c$ .

В общем случае, расход  $Q$  зависит от перепада давления  $\Delta P$  на входе в трещину (внутренняя поверхность трубы) и на выходе из трещины (внешняя поверхность). При истечении жидкости этот перепад в основном расходуется на преодоление сил трения  $\Delta P_f$ ; на изменение скорости потока  $\Delta P_a$ ; на преодоление местного сопротивления на входе в трещину  $\Delta P_e$ ; на парообразование  $\Delta P_{aph}$ .

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_f + \Delta P_e + \Delta P_{aph}.$$

Парообразование происходит в результате падения давления в трещине при движении перегретой жидкости. Рассмотрение всех упомянутых компонент давления является очень сложной задачей, решаемой в рамках теории гомогенного критического неравновесного двухфазного течения перегретой жидкости.

*Определение скорости истечения на основе Модели Генри-Фауске*

Необходимость рассмотрения неуравновешенных течений объясняется тем, что время, необходимое для обретения смесью равновесия, сравнимо с временем движения смеси между стенками трещины.

Основное выражение для скорости истечения Генри и Фауске [7] получили из условия критического течения, полученного из уравнения сохранения количества движения для двухфазного потока. Кроме того, был сделан ряд дальнейших упрощающих предположений, связанных с тем, что температуру во время течения в трещине можно считать постоянной:

- а) течение с постоянной энтропией  $s = \text{const}$  и энтальпией  $i = c_p T$ ;
- б) жидкость несжимаемая  $u_1 = u_{10} = u_{1C}$ ;
- в) удельный объем пара является функцией только давления  $u_g = u_g(P)$ ,

где  $u_1, u_g$  – удельный объем жидкости и пара соответственно;  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении. Здесь и далее индекс 0 характеризует условия на входе; индекс C характеризует критические параметры, которые соответствуют условиям на выходе.

Удельный объем смеси записывается как  $u = xu_g + (1-x)u_1$ .

С учетом этих обозначений уравнение для определения критической массовой скорости записывается так:

$$\frac{1}{G_C^2} = - \left[ x \frac{du_g}{dP} + (u_g - u_{10}) N \frac{dx_E}{dP} \right]_C,$$

где

$$N = \begin{cases} ax_E & x_E < \frac{1}{a} \\ 1 & x_E > \frac{1}{a} \end{cases},$$

где  $a = 20$  – объемное паросодержание;  
 $x$  – массовое паросодержание,

$$x_E = \frac{s_o - s_1}{s_g - s_1} \text{ – равновесное массовое паросодержание.}$$

Модель также основывается на предположении, что парообразование происходит по экспоненциальной зависимости



$$x_C = x_E \left( 1 - e^{-B \left( \frac{L_a - a}{D_H} \right)} \right),$$

где  $B = 0.0523$  - определено из эксперимента,  $L_a / D_H > 12$ ;

В работе [8] рекомендуются следующие значения:  $a = 12$  для трещин с большой шероховатостью на входе и  $a = 0$  - для малой. Здесь  $L_a$  - эффективная длина трещины (длина пути течения), ее можно определить с учетом параметров морфологии трещины.

*Точная методика на основе уравнения для двухфазного течения*

Методика на основе модели Генри-Фауске имеет ряд недостатков, в частности, не учитывает сжимаемость жидкости, не дает характера распределения давления вдоль длины трещины. Более точной является модель на основании дифференциального уравнения для одномерного гомогенного течения [9]

$$-\left( \frac{dP}{dz} \right) = \frac{C_F + C_x \frac{dx}{dz} + C_A \frac{1}{A} \frac{dA}{dz}}{1 - M^2}, \quad (24)$$

где  $C_F$ ,  $C_x$ ,  $C_A$  - так называемые коэффициенты влияния, учитывающие соответственно вклад трения, фазовых превращений и изменения площади сечения; величина  $M^2$  имеет тот же смысл, что и квадрат числа Маха для однокомпонентной среды:

$$C_F = \frac{l}{2D_H} G^2 (u_1 + x u_{1g}); \quad C_x = G^2 u_{1g};$$

$$C_A = -G^2 (u_1 + x u_{1g}); \quad M^2 = -G^2 \left[ x \frac{du_g}{dP} + (1-x) \frac{du_1}{dP} \right].$$

Формула для  $u_{1g}$

$$u_{1g} = u_g - u_1.$$

Отметим, что для определения выражения  $\frac{dx}{dz}$  необходимо учесть, что при достаточно бурном вскипании (как в случае истечения перегретой жидкости сквозь трещину), массовое паросодержание является функцией не только энтальпии, но и давления  $x = x(i, P)$

Тогда

$$\frac{dx}{dz} = \left( \frac{\partial x}{\partial i} \right)_P \frac{di}{dz} + \left( \frac{\partial x}{\partial P} \right)_i \frac{dP}{dz}, \quad (25)$$

где  $\left( \frac{\partial x}{\partial i} \right)_P = \frac{1}{i_{1g}}$  и  $i_{1g} = i_g - i_1$ .

С учетом (25) уравнение (24) записывается в виде

$$-\left( \frac{dp}{dz} \right) = \frac{\frac{l}{2D_H} G^2 (u_1 + x u_{1g}) + G^2 \frac{u_{1g}}{i_{1g}} \frac{di}{dz} - G^2 (u_1 + x u_{1g}) \frac{1}{A} \frac{dA}{dz}}{1 + G^2 \left[ x \frac{du_g}{dP} + (1-x) \frac{du_1}{dP} + u_{1g} \left( \frac{\partial x}{\partial P} \right)_i \right]}. \quad (26)$$

При постоянном сечении потока последний член в числителе не учитывается. Критическое истечение будет в том случае, если знаменатель выражения (26) будет равен нулю. Задавая  $G_C$  и  $P_C$ , необходимо решать выражение (26) численно, при этом получается характер падения давления вдоль трещины. Для более точного решения этого уравнения необходимо учитывать сжимаемость жидкости. Для решения этого уравнения можно воспользоваться любым численным методом решения дифференциальных уравнений, в частности: методом Рунге-Кутты, методом Адамса-Мултона, методом Адамса-Башфорта:

Для нахождения величин  $u_1, u_g, i_1, i_g$  необходимо воспользоваться термодинамическими таблицами [10] либо применить уравнение энергии Гиббса и дифференциальные термодинамические зависимости.

Выражение для  $i$  для смеси жидкость - пар запишется в виде  $i = i_L + x(i_g - i_L)$ .

Выражение для  $s$  для смеси жидкость - пар запишется в виде  $s_0 = s_L + x(s_g - s_L)$ .

Тогда  $x$  смеси может быть вычислен по формуле  $x = \frac{s_0 - s_L}{s_g - s_L}$ .

Производные, которые находятся в числителе, могут быть вычислены либо численно, при численном интегрировании дифференциального уравнения, либо аналитически, с помощью основных зависимостей термодинамики.

Для сравнения результатов (рис. 2) были выбраны экспериментальные данные, а также данные, полученные на основе различных моделей [8, 11].

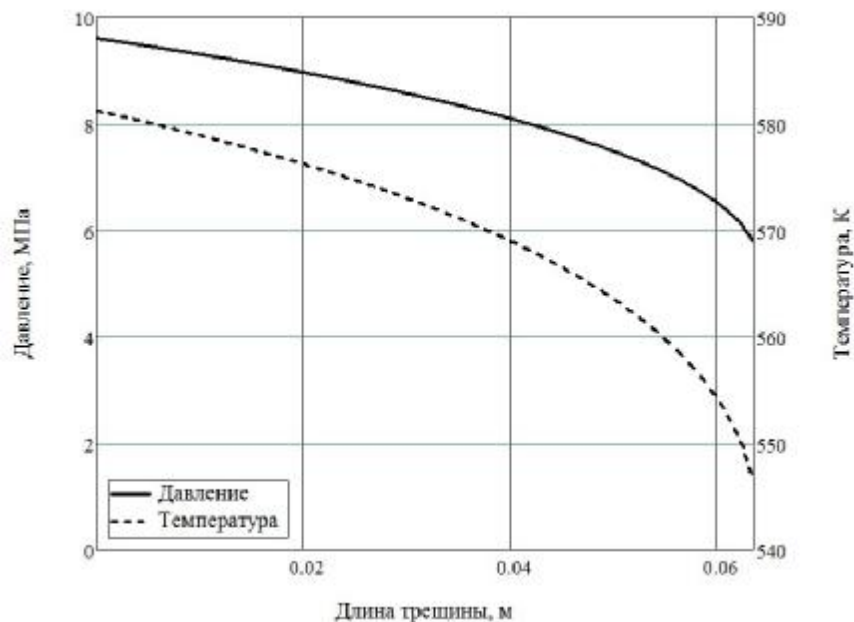


Рис. 2. Падение давления по длине трещины

В этой серии экспериментов: номинальное раскрытие трещины  $d = 0,254$  мм,  $\frac{L}{D_H} = 126$ ,  $L = 63,5$  мм. Начальное давление  $P_0 = 7,0$  МПа. Переохлаждение жидкости  $\Delta T = 3,3$  °С.

Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными. Все модели, которые используются в атомной энергетике для оценки истечения сквозь трещины, основаны на модели Генри-Фауске либо являются приближениями с помощью уравнения Бернулли. Оба эти способа являются неточными и дают ошибку, в случае использования уравнения Бернулли значительную. Для точного нахождения величины критического истечения необходимо рассматривать двухфазное течение. Наиболее точным методом является решение дифференциального уравнения для двухфазного течения.

### **Выводы**

1. Перемещения записаны в виде суммы фундаментальных перемещений для плоского тела и добавочного слагаемого заданного вида с неизвестным коэффициентом, подлежащим определению.

2. Получено соотношение для определения неизвестного коэффициента на основе комбинированного метода весовых функций через значения безразмерных КИН для оболочки со сквозной трещиной.

3. Для полиномиального поля напряжений получены общие выражения для смещений берегов трещины и даны формулы для площади ее раскрытия.

4. Сравнение величин добавочных ПРТ, полученных в настоящей работе с результатами, полученными Каствнером и Тада – Пэрисом для продольной и окружной трещин в цилиндрической оболочке соответственно, показало хорошее соответствие результатов.

5. В результате численного решения дифференциального уравнения для двухфазного потока определены параметры критического истечения теплоносителя из сквозной трещины.

## **ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩІ РОЗКРИТТЯ ТРІЩИНИ ТА ШВИДКОСТІ ВИТОКУ СЕРЕДОВИЩА В РАМКАХ КОНЦЕПЦІЇ «ТЕЧА ПЕРЕД РУЙНУВАННЯМ» ДЛЯ ТРУБОПРОВОДІВ АЕС**

**І.В. Ориняк, О.С. Яковлева, Я.Р. Дубик**

Площа розкриття наскрізної тріщини (ПРТ) в трубі та витоку теплоносія є одним з основних розрахункових параметрів в рамках концепції «теча перед руйнуванням». Існуючі підходи визначення ПРТ базуються на методі енергії для постійного навантаження, який був розроблений Сандерсом. На основі комбінованого методу вагових функцій пропонується наближений вираз для фундаментального поля переміщень при дії зосередженої сили на береги тріщини в оболонці. На його основі отримані формули для знаходження площі розкриття тріщини в поліноміальному полі напружень. Для циліндричної оболонки з повздожньою та поперечною тріщинами здійснено порівняння отриманих величин площі з літературними результатами. При визначенні швидкості витоку, на відміну від підходів, що використовують спрощувальні гіпотези для описання двофазної течії, наприклад, модель Генрі-Фауске, запропонована модель на основі диференційного рівняння для одновимірної гомогенної двофазної течії.

## **ESTIMATION of CRACK OPENING AREA and MEDIUM OUTFLOW VELOCITY in the FRAME of “LEAK before DETRUCTION” CONCEPTION for the NPP’ PIPES**

**I. Orynyak, Ye. Yakovleva, Ya. Dubik**

The crack through-the-wall opening area (COA) in the pipe and heat carrier outflow velocity both are ones of the main calculated parameters at the “leak before destruction” conception application. The existing COA calculating methods are based on the power method for the constant load developed by Sanders. On the

base of the combined method of the weight functions the approximate expression for the fundamental displacement field under polynomial load on the crack faces in the sheath is proposed. Based on this method, formulae for calculating COA in the polynomial stress field are derived. The obtained COA values and literature data for the cylindrical sheath with longitudinal and transverse cracks were compared. When determining the outflow velocity, the model based on the differential equation for one-dimensional homogeneous two-phase flow as opposed to approaches used the simplified techniques for the two-phase flow description (for example, Henry-Fauske model) was suggested.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Paris P.C.* The Application of Fracture Proof Design Methodology using Tearing Instability Theory to Nuclear Piping Postulating Circumferential throughwall Crack / P.C. Paris, H. Tada // NUREG/CR-3464, Nuclear Regulatory Commission. - 1983. – 185 p.
2. *Kastner W.* Critical crack sizes in ductile piping / W. Kastner, E. Rohrich, W. Schmitt, R. Steinbuch // Int. J. Press. Vess. Piping. - 1981. – 9. – P. 197 - 219.
3. *Ориняк І.В.* Використання наближеного фундаментального розв'язку для півплощини з крайовою тріщиною в комбінованому методі вагових функцій / І.В. Ориняк, М.В. Бородій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 1994. – 4. – P. 105 - 108.
4. *Панасюк В.В.* Предельное равновесие хрупких тел с трещинами / В.В. Панасюк. – К.: Наукова думка, 1968. – 248 с.
5. *Erdogan F.* Cylindrical and Spherical Shells with Cracks / F. Erdogan, J.J. Kibler // Int. J of Fract. Mech. - 1969. – 5. – P. 229 - 237.
6. NUREG/CR-6765. Development of Technical Basis for Leak-Before-Break Evaluation Procedures. – U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC 20555-0001, May 2002. – P. 236.
7. *Henry R.E.* The Two-Phase Critical Discharge of initially Saturated or Subcooled Liquid / R.E. Henry // Nucl. Sci. Eng. – 1970. – 41. – P. 336 - 342.
8. *Ghosh B.* Leak rates through cracks and slits in PHT pipes for LBB / B. Ghosh // Nuclear Engineering and Design. - 2002. – 212. – P. 85 - 97.
9. *Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис; пер. с англ. В.С. Данилина, Ю.А. Зейгарника; под ред. И.Т. Аладьева. – М.: Мир, 1972. – 440 с.
10. *Александров А.А.* Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справ. рек. Гос. служб. стандартных справочных данных / А.А. Александров, Б.А. Григорьев // ГСССД Р-776-98. – М.: МЭИ, 1999. – 168 с.
11. *Amos C.N.* Two – phase critical flow in slits / C.N. Amos, V.E. Schrock // Nucl. Sci. Eng. - 1984. – 88. – P. 261 - 274.

Надійшла до редакції 24.01.2013 р.  
Після доопрацювання 19.02.2013 р.