

В.Г. ПЕТРОСЯН, Т.О. ОВАКИМЯН

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЩЕЛЕВОГО КАНАЛА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ, КАЛИБРОВАНИЯ И ТЕСТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ТЕЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР

С целью модернизации методов и средств диагностики течи теплоносителя реакторов типа ВВЭР разработана модель щелевого канала (ЩК) на основе конического сопла. В основе расчетов модели лежит выражение Бернулли для скорости истечения вязкой и несжимаемой жидкости через небольшое отверстие стенки сосуда, находящейся под давлением. Получена формула объемного расхода жидкости через ЩК для случая аппроксимации выходного раскрытия щели к прямоугольнику с учетом коэффициентов гидравлического сопротивления, шероховатости стенок, а также зависимости площади раскрытия щели от длины, следуемой из упруго-пластической теории механики. Модель ЩК может быть использована при разработке средств диагностики, а также при калибровке и тестировании диагностических систем течи теплоносителя.

Ключевые слова: концепция ТПР ("течь перед разрушением"), диагностические системы течи, модель щелевого канала, аппроксимация контура раскрытия щели, коэффициент гидравлического сопротивления, коэффициент шероховатости стен, объемный расход течи.

Введение. В комплексе мероприятий по обеспечению безопасного функционирования атомных реакторов типа ВВЭР важное место отводится диагностическим методам, которые составляют неотъемлемую часть мероприятий, направленных на своевременное предотвращение аварий с образованием сквозных трещин или разрывов в сосудах высокого давления (трубопроводов) и, как следствие, с истечением теплоносителя из главного циркуляционного контура реактора (ГЦК). Эти мероприятия следует организовывать и выполнять в соответствии с идеологией концепции "течь перед разрушением" (ТПР), содержащей ряд основополагающих требований, включающих этапы конструирования, изготовления и эксплуатации трубопроводов под давлением [1,2]. Концепция ТПР требует в обязательном порядке применения чувствительных и надежных диагностических систем течи, способных локализовать течь в главном циркуляционном контуре (ГЦК) реакторной установки (РУ) и подавать сигнал тревоги системе защиты реактора после окончательного подтверждения факта течи.

Диагностические системы течи подразделяются на «интегральные» и «локальные», которые основываются на принципе измерения различных параметров физических явлений, сопутствующих течи.

Интегральные системы предназначены для регистрации факта течи без ее локализации. В частности, на 2-ом энергоблоке Армянской АЭС установлены интегральные системы, измеряющие радиоактивность аэрозолей, влажность и температуру проб воздуха герметических боксов и другие показатели ГЦК и РУ.

Локальные системы, кроме обнаружения факта течи и оценки скорости объемного расхода теплоносителя, определяют также ее место. При этом обычно измеряются: относительная влажность, температура воздуха, уровень высокочастотного акустического шума в корпусе ГЦК, интенсивность теплового инфракрасного излучения и т.д. [3]. Примерами таких систем являются "ALÜS" и "FLÜS" немецкой фирмы "Siemens", построенные на разных физических принципах. Система "ALÜS" реагирует на изменение уровня высокочастотного акустического шума в ГЦК и реакторном корпусе в диапазоне частот 100...400 Гц, вызванного течью теплоносителя из любых неуплотнений или щелевых каналов ГЦК. Отметим, что на 2-ом энергоблоке Армянской АЭС установлена система "СКТТ", аналогичная системе "ALÜS". Опыт эксплуатации СКТТ показывает, что посторонние шумы часто интерпретируются системой как "события". Кроме того, согласно результатам последней инспекции диагностических систем течи Армянской АЭС, отмечается, что система "СКТТ" определяет место течи, но не обеспечивает установленную минимальную чувствительность регистрации скорости течи (3,8 л/мин) [4]. Отметим также, что в литературе отсутствует информация относительно процедуры калибрования чувствительности по течи.

Растущие требования к повышению чувствительности, точности и надежности диагностических систем течи требуют совершенствования диагностических методов и средств. В последнее время ведутся исследования по разработке локальных диагностических систем течи, работающих на принципе измерения относительной влажности проб воздуха, околоповерхностных слоев сосудов давления, отбираемых с помощью перфорированных сенсорных пробоотборных труб, монтируемых под теплоизоляционным слоем труб ГЦК, в подколпачном объеме реактора и в других местах [5,6]. Исследования проводятся на специальном стенде, в состав которого обычно входят: участок трубопровода ГЦК; емкость теплоносителя с адекватными параметрами теплоносителя ВВЭР реактора; узел имитатора ЩК; сенсорные пробоотборники, датчики влажности и температуры; модуль сбора, преобразования, обработки и анализа данных измерений.

Анализ литературы показывает, что в разрабатываемых диагностических системах недостаточно представлена модельная основа узла имитации течи ЩК, хотя она является ключевой для этих систем. Особенно важен вопрос, насколько адекватно модельная щель отображает (имитирует) реальную щель. От этого зависит корректность сравнения результатов эксперимента с реальной ситуацией.

В связи с этим возникла задача разработки математической (геометрической) модели щелевого канала, учитывающей основные параметры ЩК (длину, площадь раскрытия, глубину канала, коэффициенты гидравлического сопротивления и шероховатость стен) с возможностью перестраивания этих параметров. Предлагаемая модель ЩК будет использоваться при тестировании чувствительности к течи существующих диагностических систем, в частности, на 2-ом энергоблоке Армянской АЭС. Она может использоваться также и в других задачах, например, для корректного конструирования имитатора малых течей, используемого при разработке диагностических систем течей на основе анализа относительной влажности проб воздуха ГЦК.

1. Анализ геометрии раскрытия сквозной трещины. В теоретических моделях механики разрушения учитываются различные факторы, влияющие на величину раскрытия сквозных трещин в металлических конструкциях [7]: уровень и распределение напряжений в конструкции, геометрические характеристики элементов, свойства материалов и т.д. В частности, для области упруго-пластических напряжений величина раскрытия щели (в зависимости от координаты x по длине щели) определяется формулой [8]

$$V(x) = \frac{1+k}{8 \pi G} \sigma_F (c+p) \left\{ \cos \varphi \left[\ln \frac{\sin^2(\theta - \varphi)}{\sin^2(\theta + \varphi)} \right] + \cos \theta \left[\ln \frac{(\sin \theta + \sin \varphi)^2}{(\sin \theta - \sin \varphi)^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

где $V(x)$ - половина раскрытия щели в точке x вдоль трещины. Коэффициент k выражается через коэффициент Пуассона ν . Для плоско-напряженного состояния $k=(3-\nu)/(1+\nu)$; для условий плоских напряжений $k=3/4$; $G=E/2(1+\nu)$, где E (модуль Юнга; $\theta=\pi\sigma/2\sigma_F$; $p=c[1/\cos\theta]-1$); σ - приложенное напряжение; σ_F - напряжение течения; p - длина пластичной зоны; φ - величина, зависящая от x ; c - половина длины щели. На рис.1 приведен упрощенный вариант щелевого контура.

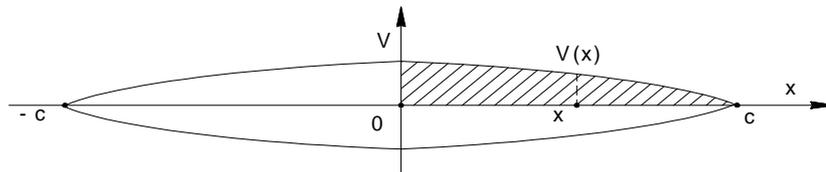


Рис.1. Упрощенный вариант щелевого контура. $V(x)$ – половина раскрытия щели в точке x вдоль трещины. Заштрихованная часть составляет $1/4$ всей площади щели

В силу симметричности контура щели площадь ее раскрытия можно вычислить интегралом

$$A = 4 \int_0^c V(x) dx. \quad (2)$$

При этом предполагается, что центр координат установлен в точке центра тяжести контура щели, ось абсцисс направлена вдоль длины щели, а ось ординат (в поперечном направлении. $V(x)$ определяется выражением (1); c - половина длины щели ($c=l/2$); 0 - координата центра тяжести щели.

В табл. 1 представлены результаты вычислений площади раскрытия щели S_0 в зависимости от ее длины l_0 на основе формул (1) и (2) для двух значений давлений [7].

Приведенные данные показывают, что площадь раскрытия щели растет по степенному закону при возрастании ее длины. Эту закономерность далее будем называть зависимостью “ $l_0 - S_0$ ”.

Таблица 1

Вычисленные значения площади раскрытия щели
в зависимости от длины для двух значений давления

$l_0, \text{мм}$	16	32	48	64	80	96	112	128	144	160	176	192
$S_0, \text{мм}^2$ 12,5 МПа	0,8	3,4	8,5	17	30,2	50	77	115	164	229	317	413
$S_0, \text{мм}^2$ 17,5 МПа	2,0	4,8	13	23,8	44	70	109	161	230	321	430	578

2. Расчет расхода жидкости через щелевой канал. Для теоретического решения задачи расчета расхода жидкости через ЩК обратимся к выражению Бернулли для скорости $v(\text{м/с})$ истечения вязкой и несжимаемой жидкости сквозь небольшое отверстие на стене сосуда давления [9]:

$$v = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}, \quad (3)$$

где $\Delta P(\text{Па})$ - разность давлений жидкости в сосуде и внешней среде; $\rho(\text{кг/м}^3)$ - плотность жидкости; ξ - безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления, который обычно представляется суммой двух членов:

$$\xi = \xi_M + \xi_{\text{тр}}; \quad (4)$$

ξ_M - коэффициент входного сопротивления, обусловленный входной геометрией сопла; $\xi_{\text{тр}}$ - коэффициент сопротивления, обусловленный вязкими свойствами жидкости.

Вычисления показывают, что для труб Ду500 истечения теплоносителя из щелей размерами в пределах 32...192 мм, в условиях давления жидкости 12,5 МПа, соответствующие числа Рейнольдса изменяются в пределах $0,15 \cdot 10^5 \dots 3,42 \cdot 10^5$, что выражает турбулентный характер истечения. Коэффициент трения $\xi_{\text{тр}}$ для такого режима гидродинамического течения определяется формулой Дарси-Вайсбаха

$$\xi = \mu h_0 / D_0, \quad (5)$$

где D_0 - эквивалентный диаметр круглой трубки; h_0 - длина трубки; μ - коэффициент, который в общем случае зависит от диаметра, степени шероховатости стенок и числа Рейнольдса для трубки. Отметим, что для коэффициента μ предложены разные полуэмпирические формулы в зависимости от степени шероховатости.

Для случая шероховатости стенок трубы, значительно отличающейся от «песочной» шероховатости, предлагается формула

$$\mu = \frac{\Delta}{z D_0}, \quad (6)$$

где коэффициент z принимается равным единице для каналов, у которых глубина h_0 много больше ширины (в частности, для труб Ду500 $h_0=32 \text{ мм}$); Δ - эквивалентная шероховатость,

величину которой окончательно можно будет установить экспериментально. Ясно, что численные значения μ для заданного значения D_0 будут меняться в зависимости от эквивалентной шероховатости.

Поместим начало координат x и y в центре тяжести раскрытия щели, направив ось x по длине щели, а y - в поперечном направлении в плоскости раскрытия. Из-за симметричности контура раскрытия щели будем рассматривать только ее первую четверть (она показана на рис.1 штриховкой). Истечение жидкости через щель можно представить как сумму истечений жидкости через элементарные трубочки, заполняющие щель. Поэтому объемный расход жидкости через такую щель с площадью раскрытия B можно оценить интегралом

$$Q = \epsilon \int_B v \, ds, \quad (7)$$

где ds и v - соответственно площадь сечения элементарной трубки и скорость истечения жидкости из нее. Интегрирование производится по сечению раскрытия щели B , а ϵ описывает явление сжатия струи [9].

Разобьем такую щель вдоль оси x на элементарные щели шириной dx . Так как величина раскрытия щели в точке x определяется значением функции $V(x)$ в этой точке, то площадь элементарной щели будет $ds=V(x)dx$, а соответствующий ей эквивалентный диаметр трубочки - $V(x)$.

Подставляя выражение (6) в (5) и заменив диаметр трубки D_0 значением раскрытия щели в точке x , для коэффициента трения получим

$$\xi_{\text{тр}} = h_0 \Delta / V^2(x). \quad (8)$$

Подставляя это выражение в формулу (4), затем полученное (в (3) и, наконец, (3) в (7), принимая для простоты $\epsilon=1$, окончательно получим выражение для объемного расхода вытекающей жидкости из полного щелевого канала, выходной контур которого описывается функцией $V(x)$

$$Q(\Delta) = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \int_0^{l/2} \frac{4 V^2(x) dx}{\sqrt{(1 + \xi_M) V^2(x) + h_0 \Delta}}. \quad (9)$$

Контур раскрытия щели $V(x)$ можно с достаточной точностью аппроксимировать к эллипсу, трапеции или к прямоугольнику (рис.2). Напомним, что начало координатных осей x - y находится в центре тяжести кривых, а ось x направлена вдоль длины щели.

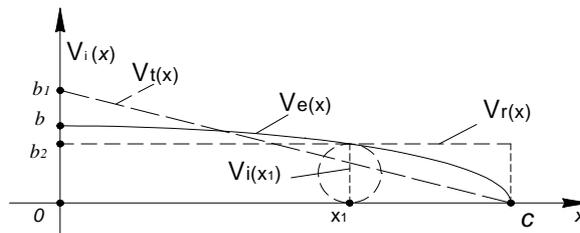


Рис.2. Схематическое представление одной четверти контуров щелей для трех аппроксимаций. $V_i(x_1)$ – половина ширины щели i -го контура в некоторой точке x_1 щели; кругом схематически показано сечение соответствующей элементарной трубочки для этой точки. $V_e(x)$ – эллиптический контур (сплошная линия); $V_r(x)$ – прямоугольный контур (прерывистая линия) и $V_t(x)$ – трапециевидный контур

Если предположить, что независимо от формы выходного раскрытия все щели имеют одинаковую длину и подчиняются зависимости " l_0-S_0 ", то соответствующие аналитические выражения для контуров эллиптического $V_e(x)$, трапециевидного $V_t(x)$ и прямоугольного $V_r(x)$ контуров будут

$$V_e(x)=b\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}; V_t(x)=b_1(1-x/a); V_r(x)=b_2, \quad (10)$$

где $a=l/2$, $b=2S/\pi \cdot l$ и $S=\pi \cdot a \cdot b$ -соответственно полуоси и площадь эллипса $b_1=S/l$ – половина малой диагонали трапеции; $b_2=S/2$ (половина ширины прямоугольника; l (длина щели.

Результаты вычислений объемных расходов жидкости Q_e , Q_t и Q_r по формуле (9), соответственно, для вышеуказанных трех аппроксимаций контура $V(x)$ щели в зависимости от величины шероховатости Δ , дают весьма близкие результаты. В частности, для случая щелей с эллиптическим $V_e(x)$ и прямоугольным $V_r(x)$ контурами, при постоянной глубине щелевого канала 32 мм, относительная ошибка, вычисленная формулой $100 \cdot (Q_e - Q_r) / Q_r$, не превышает 7,3% даже при весьма больших значениях шероховатости ($\Delta \sim 0,1$ мм). Причем с ростом длины щели ошибка уменьшается.

Из вышесказанных рассуждений, приведенных в п.2, следует, что можно с достаточной точностью моделировать сквозную щель сосудов, находящихся под давлением, а также явление течи теплоносителя через щелевой канал, моделируя ее раскрытие прямоугольным контуром.

4. **Анализ геометрической модели ЩК с прямоугольным контуром.** С технической точки зрения могут быть различные решения для вышеуказанной модели. Одно из них – применение конструкции на основе конического сопла. Схематически такой щелевой канал представлен на рис.3.

5.

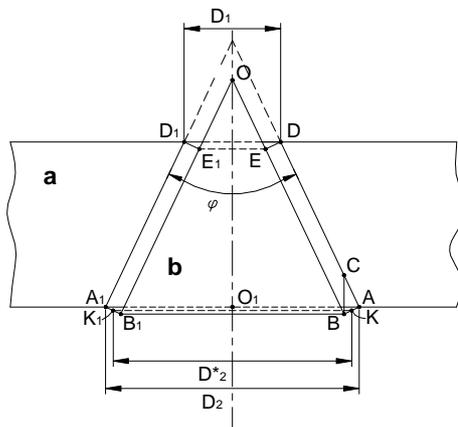


Рис. 3. Схематическое изображение конического щелевого канала: а - неподвижное коническое сопло; б- подвижная коническая вставка; $AA_1 = D_2$ и $DD_1 = D_1$ - соответственно диаметры выходного и входного раскрытий ЩК; $BC=\lambda$ - величина смещения вставки б вдоль оси симметрии OO_1 ; $ABED$ и $A_1B_1E_1D_1$ - осевые срезы ЩК; $\delta=AB=A_1B_1$ - ширина выходного щелевого раскрытия; D^*_2 - средний диаметр выходного раскрытия канала

Щелевой канал образуется при внедрении в неподвижное сопло AA_1D_1D , с углом вершины φ подвижной конической вставки BB_1O с таким же углом вершины, смещенной на небольшую величину $BC=\lambda$ вдоль общей оси симметрии OO_1 . При этом длина образовавшегося щелевого канала не зависит от λ , а выходное раскрытие канала представляет собой коническую поверхность вращения.

Оценка конструктивных параметров модели ЩК выполнена в приложении 1.

Результаты оценки систематизированы в табл. 2, где представлены также рассчитанные по формуле (9) величины объемного расхода течи для значений констант $\Delta_{\text{экв}}=0,005$ и $\xi_M=1$.

Таблица 2
Оценка конструктивных параметров модельного ЩК,
выполненная на основе (I_0-S_0) связи

$l_0, \text{ мм}$	$S_0, \text{ мм}^2$	$D_2, \text{ мм}$	$\varphi, \text{ град}$	$\varphi^*, \text{ град}$	$\lambda_m, \text{ мм}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$
16,000	0,800	5,093	9,129	4,564	1,256	$5,558 \cdot 10^{-6}$
32,000	3,430	10,186	18,316	9,158	1,343	$5,073 \cdot 10^{-5}$
48,000	8,500	15,279	27,623	13,812	1,473	$2,046 \cdot 10^{-4}$
64,000	17,030	20,372	37,121	18,561	1,650	$5,986 \cdot 10^{-4}$
80,000	30,200	25,465	46,892	23,446	1,858	$1,435 \cdot 10^{-3}$
96,000	49,730	30,558	57,040	28,520	2,103	$3,010 \cdot 10^{-3}$
112,000	77,000	35,651	67,703	33,851	2,361	$5,589 \cdot 10^{-3}$
128,000	115,000	40,744	79,080	39,540	2,656	$9,565 \cdot 10^{-3}$
144,000	164,000	45,837	91,483	45,741	2,930	$1,500 \cdot 10^{-3}$

Как видно из результатов табл. 2, величина расхода Q растет по степенному закону при возрастании величины λ . Отметим, что можно значительно повлиять на величину Q через изменение параметров ξ_M и $\Delta_{\text{экв}}$.

Таким образом, предлагаемая модель щелевого канала на основе конического сопла дает возможность:

- адекватно представлять основные физические характеристики реального щелевого канала, а также основную теоретическую зависимость между длиной и площадью раскрытия ЩК;
- четко и обоснованно конструировать узел имитатора протечек с модельным ЩК для использования его в стендовых исследованиях;
- разработать физические средства для систем диагностики мониторинга течи теплоносителя с применением метода физического моделирования исследуемого объекта (напр., участок трубопровода ГЦК);
- калибровать чувствительные элементы и каналы диагностических систем течи для решения прямой диагностической задачи определения величины течи.

Оценка конструктивных параметров модели ЩК

Средний диаметр выходного щелевого канала ($D^* = D_2 - \lambda/2 \cdot \sin \varphi$ определяет длину эквивалентной прямоугольной щели $I_r = \pi \cdot (D_2 - \lambda/2) \cdot \sin \varphi$), которую при $\lambda/D_2 < 1$ приближенно можно рассчитать формулой - $I_r^* \approx \pi \cdot D_2$, где D_2 – диаметр выходного раскрытия конического неподвижного сопла. При этом площадь поверхности эквивалентной прямоугольной щели определяется соотношением

$$S_r \approx \pi \cdot D_2 \cdot \lambda \cdot \sin(\varphi/2). \quad (11)$$

Из рис.2 следует выражение для угла вершины конусов

$$\varphi = 2 \arcsin [D_2 (1-P) / 2 h_0], \quad (12)$$

где $P = D_1/D_2$. Практически в качестве значения угла вершины конусов можно использовать среднее значение между соответствующими крайними значениями при $P=1$ и $P=0$:

$$\varphi^* = (\varphi_1 + \varphi_2)/2 = \arcsin [D_2 / 2 h_0]. \quad (13)$$

Подставляя в формулу (9) вместо $Vr(x) = b_2$ эквивалентную величину для конического сопла $\delta = \lambda \cdot \sin(\varphi/2)$ и учитывая, что $I_r \approx \pi \cdot D_2$, получим выражение для оценки объемного расхода жидкости, вытекающего из ЩК;

$$Q_s(\Delta) = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho} \frac{\pi D_2 \lambda^2 \sin^2(\varphi/2)}{\sqrt{(1 + \xi_M) \lambda^2 \sin^2(\varphi/2) + 4 h_0 \Delta_{\text{эkv}}}}}. \quad (14)$$

Перечислим последовательность моделирования ЩК:

1. Прежде всего по табл.1 выбирается определенная пара значений (I_0, S_0) для теоретической щели в соответствии с зависимостью “ I_0-S_0 ”.
2. Определяется длина эквивалентной прямоугольной щели формулой $I_r^* \approx \pi \cdot D_2$, где D_2 – выходной диаметр неподвижного конического сопла ЩК.
3. По формуле (13) вычисляется угол φ при вершине неподвижного конического сопла.
4. Выбираются коэффициенты $\Delta_{\text{эkv}}$ и ξ_M соответственно для шероховатости поверхностей щелевого канала и его гидравлического сопротивления.
5. Адекватность теоретической и модельной щелей обеспечивается установлением величины смещения подвижной вставки относительно неподвижного сопла формулой $\lambda_M = S_0 / \pi \cdot D_2 (\sin(\varphi^*/2))$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Irwin G.R., Brawley J.E.** Progress in the development of the crack toughness fracture tests // Materialprüfung. - 1962. – Vol.4. – P.1-11.
2. **US NRC Standard review plan**, 3.6.3 Leak Before Bread evaluation procedures, USNRC, Washington, DC, 1986.
3. **Leak Detection and Monitoring Systems**. Ageing Phenomena and Diagnostics for PWR-Type Reactors // IAEA Interregional Training course 25 November-13 December 1996, Siemens AG, Erlangen, Germany, 1996. – P.1-52.
4. **Technical Report**. Project A1.01/00A-Lot2; LBB Application to Armenia NPP Unit 2. Definition of new Leak Detection System (LDS) configuration. Deliverable 5, Rev1. April 2005, Part 2.

5. **Moisture Leakage Monitoring System "FLBS".** Ageing Phenomena and Diagnostics for PWR-Type Reactors // IAEA Interregional Training course 25 November-13 December 1996, Siemens AG, Erlangen, Germany, 1996.– P. 20-22.
6. **Документация по разработке системы обнаружения течи по влажности** СОРТВ для АЭС типа ВВЭР-440/В-179. – М., 2004. Документация получена от разработчиков ВНИИАЭС по нашей просьбе.
7. **Гетман А.Ф.** Концепция безопасности "Течь перед разрушением для сосудов и трубопроводов давления АЭС". – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 258 с. –ISBN 5-283-031151-9. См. литературу в разделе 1.6 книги.
8. **Dugdale D.S.** // J. Mech. Phys. Solids. –1960. –Vol.8. – P. 100-104.
9. **Емцов. Б.Т.** Техническая гидромеханика. – М.: Машиностроение, 1978. –463с.
10. **Альтшуль А.Д.** Гидравлические сопротивления. – М.: Физматгиз, 1960. –82с.
НИИ «Арматом». Материал поступил в редакцию 10.06. 2007.

Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Տ.Հ. ՀՈՎԱԿԻՄՅԱՆ

ՃԵՂՔԱՅԻՆ ԿԱՆԱԼԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈՂԵԼ ՋՋԷՌ ՏԻՊԻ ԱՏՈՄԱՅԻՆ ՌԵԱԿՏՈՐՆԵՐԻ ՋԵՐՄԱԿՐԻ ԱՐՏԱՀՈՍՔԻ ԱՆՏՈՐՈՇԻՉ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ, ՉԱՓԱԲԵՐՄԱՆ ԵՎ ԹԵՍԹԱՎՈՐՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

ՋՋԷՌ տիպի ատոմային ռեակտորի ջերմակրի արտահոսքի ախտորոշիչ մեթոդների եւ միջոցների կատարելագործման նպատակով մշակվել է ճեղքային կանալի մոդել՝ կոնական փողրակի հիման վրա: Մոդելի հաշվարկների հիմքում դրված է ճնշման անոթի փոքր անցքից անսեղմելի եւ մածուցիկ հեղուկի արտահոսքի արագության Բեռնուլու բանաձևերը: Ստացվել է մոդելային կանալով հեղուկի արտահոսքի ծավալային ծախսի բանաձևեր՝ մոտարկելով ճեղքի ելքային բացվածքի ուրվագիծը ուղղանկյունով, հաշվի առնելով ճեղքի հիդրավլիկ դիմադրության, մակերևութային խորդուբորդությունների գործակիցները, ինչպես նաև մեխանիկայի առաձգականության-պլաստիկության տեսությունից հետևող ճեղքի բացվածքի երկարության եւ մակերեսի միջեւ կապը:

Առանցքային բառեր. արտահոսք փուլումից առաջ՝ հայեցակարգ, արտահոսքի ախտորոշիչ համակարգեր, ճեղքային կանալի մոդել, ճեղքի բացվածքի մոտարկում, հիդրավլիկ դիմադրության գործակից, ճեղքի մակերևութային խորդուբորդություններ, արտահոսքի ծավալային ծախս:

V.G. PETROSYAN, T.H. HOVAKIMYAN

CRACK-OPENING CHANNEL OF MATHEMATICAL MODEL FOR TASKS OF DEVELOPING, CALIBRATING AND TESTING OF COOLANT LEAK DIAGNOSTICS SYSTEMS OF WWER-TYPE NUCLEAR REACTORS

With the purpose to improve coolant-leaks diagnostics methods of WWER-types' nuclear reactors, the crack-opened channel model based on the conical nozzle is developed. Bernoulli's formula for velocity of viscous and incompressible liquid leak through a small hole of pressure vessel underlies the model's calculations. The working formula of leak volume-rate is received for the case of approximation of the crack-opening area to the rectangle. The factors of hydraulic resistance, surface roughness and the ratio between crack's length and crack-opening area, from elastic-plastic mechanics theory, are taken into account in the formula.

Keywords: LBB (leak before break) conception, leak diagnostic systems, crack-opened area model, crack-open area approximation, hydraulic resistance coefficient, crack surface roughness, leak volumetric rate.