


# ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ OPERATION OF FACILITIES NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.18: 621.039.58: 621.311.25  
<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-05>  
 EDN SGEMEM



## Оценка эффективной длины микротрещин, возникающих в водо-паропроводе при циклическом режиме работы парогенератора АЭС

А.П. Елохин  

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия  
 elokhin@yandex.ru

**Аннотация.** При эксплуатации водо-водяных реакторов, включая и реакторы типа КЛТ-40, широко используемых в настоящее время на ледоколах и плавучих энергоблоках (ПЭБ), остро стоит вопрос о продолжительности безопасной работы парогенераторов. Проблема связана с образованием микротрещин в водо-паропроводе парогенератора, при нормальной эксплуатации на мощности, через которые в паропровод проникает радиоактивный азот  $^{16}\text{N}_7$ , содержание которого в паре как раз и свидетельствует о признаке нарушения герметичности водо-паропровода второго контура парогенератора. Этот эффект, получивший в дальнейшем название «протечки», рассматривался ранее в ряде работ авторов в условиях циклической работы водопарового режима парогенератора. В настоящей работе основное внимание уделяется математическому и физическому анализу механизмов, обуславливающих образование микротрещин в паропроводе парогенератора, возникающих в области паропровода, в которой уравниваются давления воды и пара, а также проводится оценка их эффективной длины. Проведены расчеты температурного распределения по толщине паро-трубопровода в переходной области пар-вода при периодическом «захлестывании» этой области водой. При этом показано, что в зависимости от времени периода колебаний пар-вода радиальное температурное распределение по толщине трубки демонстрирует существенное различие в распределении при постоянной температуре на внешней поверхности трубки, причем максимальная разность температур наблюдается в области внутренней поверхности трубки. Распределение механических напряжений, возникающих в металле трубки, характеризуется линейной зависимостью напряжений от температуры, максимальное значение которых соответствует максимальной разности температур, характерных для области внутренней поверхности трубки. Это позволяет констатировать, что образование трещин начинается именно с области внутренней поверхности трубки парогенератора в указанной переходной его области.


**Ключевые слова:** микротрещины в парогенераторе, энергетический реактор, радионуклид, давление, температура, мощность дозы, радиационная безопасность.

**Для цитирования** Елохин А.П. Оценка эффективной длины микротрещин, возникающих в водо-паропроводе при циклическом режиме работы парогенератора АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):32-45. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-05>

**For citation:** Elokhin A.P. Estimation of the effective length of microcracks occurring in the water-steam pipeline at cyclic operation mode of NPP steam generator. *Global nuclear safety*. 2023;13(4):32-45 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-05>

## Estimation of the effective length of microcracks occurring in the water-steam pipeline at cyclic operation mode of NPP steam generator

Alexander P. Elokhin  

National Research University «MEPhI», Moscow, Russia  
 elokhin@yandex.ru

**Abstract.** During operation of water-water reactors including KLT-40 type reactors widely used nowadays on icebreakers and floating power units (FPU), the issue of the duration of safe operation of steam generators is acute. The problem is connected with the formation of microcracks in the steam generator water and steam piping during normal operation at power, through which radioactive nitrogen  $^{16}\text{N}_7$  enters the steam piping, the content of which in the steam is just a sign of leakage failure of the steam generator second circuit water and steam piping. This effect, further named "leaks", was considered earlier in a number of works of the authors under conditions of cyclic operation of the steam generator water-steam mode. In the present work the main attention is paid to mathematical and physical analysis of the mechanisms causing the formation of microcracks in the steam pipeline of a steam generator arising in the steam pipeline region in which water and steam pressures are balanced, and their effective length is estimated. Calculations of temperature distribution along the steam-pipe thickness in the steam-water transition region at periodic "slamming" of this region with water are carried out. It is shown that depending on the time period of steam-water oscillations, the radial temperature distribution along the tube thickness shows a significant difference in the distribution at a constant temperature on the outer surface of the tube, and the maximum temperature difference is observed in the area of the inner surface of the tube. The distribution of mechanical stresses arising in the tube metal is characterized by a linear dependence of stresses on temperature, the maximum value of

which corresponds to the maximum temperature difference characteristic of the area of the inner surface of the tube. This allows us to state that the formation of cracks starts exactly from the area of the inner surface of the tube of the steam generator in the specified transitional area of the tube.

**Keywords:** steam generator microcracks, power reactor, radionuclide, pressure, temperature, dose rate, radiation safety.

## Введение

При эксплуатации водо-водяных реакторов, включая и реакторы типа КЛТ-40, широко используемых в настоящее время на ледоколах и плавучих энергоблоках (ПЭБ), остро стоит вопрос о продолжительности безопасной работы парогенераторов. Проблема связана с образованием трещин в паропроводе парогенератора, при нормальной эксплуатации на мощности, через которые в паропровод проникает радиоактивный азот  $^{16}\text{N}_7$  ( $T_{1/2} = 7,11$  с, с энергией  $\gamma$ -излучения  $E_{\gamma, \max} = 6,134$  МэВ и квантовым выходом  $\nu_{\gamma, \max} = 69\%$ ), содержание которого в паре как раз и свидетельствует о признаке нарушения герметичности водопаропровода второго контура парогенератора [1, 2]. Этот эффект, получивший в дальнейшем название «протечки», рассматривался в работах [3–6]. Авторами была разработана математическая модель, позволяющая определить область формирования протечки в парогенераторе и провести расчеты, которые предоставили возможность получить оценку мощности «вброса» исследуемого радионуклида из теплоносителя первого контура в паропровод парогенератора. Эта область  $L_0$  включает в себя границу раздела сред пар-вода, которая нагревается за счет передачи тепла от воды первого контура, обтекающей паропровод, создавая избыточное давление пара.

## Общая часть

В настоящей работе основное внимание уделяется математическому и физическому анализу механизмов, обуславливающих образование в металле паротрубопровода микротрещин длиной  $l$  (рис. 1), способствующих возникновению протечки в паропроводе парогенератора, а также осуществляется оценка их эффективной длины, которая периодически заполняется то паром, то водой, возникающей в выделенной области паропровода, поскольку у парогенератора задействована обратная связь, позволяющая автоматизировать процесс поддержания уровня воды в водопаропроводе на некотором заданном уровне  $L_0$ , значение которого определено в работах авторов [3–6].

Теплообменник парогенератора выполнен из теплообменных труб с внешним диаметром 16 мм и толщиной  $\delta = 1,4 - 1,5$  мм ( $\delta = R_0 - R_1$ ) (см. рис. 1) изготовленных из стабилизированной титаном нержавеющей стали ОХ18Н10Т с плотностью  $\rho_{\text{ст}}$ , удельной теплоемкостью  $C$ , [Дж/(кг·град)] и коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ , [Вт/м·град], значения которых как функция температуры (град) приведены в таблице 1.

С учетом того, что температура воды существенно ниже температуры пара в области  $\Delta L_0$ , теплообменник будет синхронно изменять температуру, что приведет к возникновению механических напряжений  $\sigma_T(T)$  на указанном участке теплообменных труб и связанных с

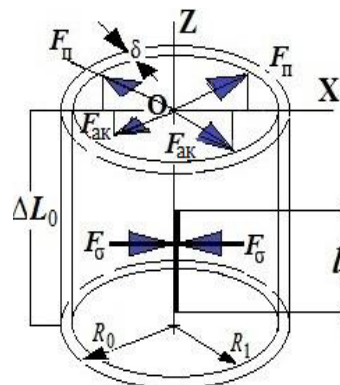


Рисунок 1. Действие сил на участок трубы парогенератора в области раздела сред вода/пар:  $F_n$  – механические силы, обусловленные давлением пара в трубе;  $F_{ak}$  – силы акустического воздействия, возникающие в паре;  $F_\sigma$  – силы механических напряжений, обусловленных расширением и сжатием, возникающие в стенке трубы при изменении температурного режима в процессе эксплуатации парогенератора

Figure 1. Force action on the steam generator pipe section in the water/steam interface:  $F_n$  is mechanical forces due to steam pressure in the pipe;  $F_{ak}$  is acoustic forces arising in the steam;  $F_\sigma$  is mechanical stress forces due to expansion and contraction, arising in the pipe wall at the change of the temperature regime during operation of the steam generator

Таблица 1 Характеристика стали 12Х18Н10Т<sup>1</sup>  
Table 1. Characteristics of 12Cr18Ni10T steel<sup>1</sup>

T (град)	E 10 <sup>5</sup> (МПа)	$\lambda$ (Вт/(м·град))	$\rho_{\text{ст}}$ (кг/м <sup>3</sup> )	C (Дж/(кг·град))	10 <sup>-6</sup> D (м <sup>2</sup> /с)
20	1,98	15	7920	-	-
100	1,94	16	-	462	4,369
200	1,89	18	-	496	4,583
300	1,81	19	-	517	4,646
400	1,74	21	-	538	4,924
500	1,66	23	-	550	-
600	1,57	25	-	563	-
700	1,47	27	-	575	-
800	-	26	-	596	-

ними сил  $F_\sigma(T)$  (см. рис. 1), способствующих возникновению трещин, через которые радиоактивный азот  $^{16}\text{N}_7$ , находящиеся в воде первого контура, омывающей парогенератор, проникает в парогенератор, определяя так называемую протечку азота, выходящего с паром на турбину (рис. 2).

<sup>1</sup> Характеристика стали 12Х18Н10Т. – URL: <https://inoxtrade.ru/info/commoninfo/item100590/stal-12h18n10t/> (дата обращения: 16.09.2023)

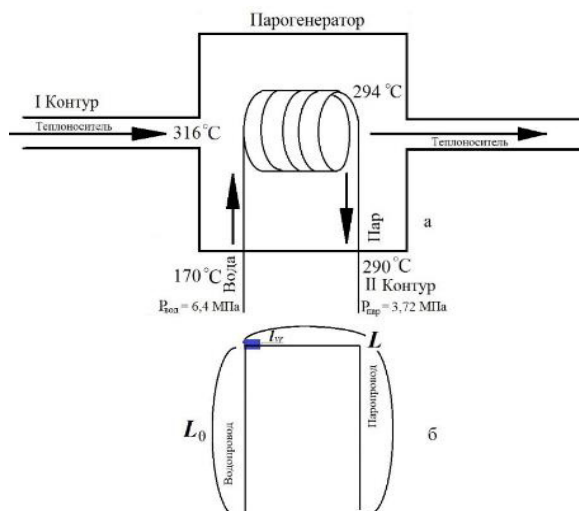


Рисунок 2. Иллюстрация к вопросу о протечке радионуклида 16N из первого контура в паропровод второго – (а); к расчёту плотности пара  $\rho p(x)$  и объёмной активности  $QN(x, t)$  16N в паропроводе парогенератора – (б);  $lvr$  – ширина области протечки (энергетические характеристики пара и воды приводятся из работ [1, 2])

Figure 2. Illustration to the question of 16N radionuclide leakage from the first circuit into the steam line of the second circuit – (a); calculation of steam density  $\rho p(x)$  and volumetric activity  $QN(x, t)$  of 16N in the steam line of the steam generator – (b);  $lvr$  is width of the leakage area (energy characteristics of steam and water are given from [1, 2])

Нетрудно понять, что подобная ситуация создает радиационно-опасную обстановку, противоречащую нормам радиационной безопасности (НРБ-99). Формированию трещин в области  $\Delta L_0$  также способствует внутреннее давление пара, создавая силы  $F_{\pi} = P_{\pi} \cdot 2\pi R_1 l$ , стремящиеся разорвать трубки парогенератора, а также, возможно, звуковые колебания, возникающие в паре, оказывая дополнительное внутреннее давление в виде сил  $F_{ак} = P_{ак} \cdot 2\pi R_1 l$ , где  $P_{\pi}$  и  $P_{ак}$  давления пара и акустических колебаний соответственно в паропроводах парогенератора.

Поскольку процесс работы, состоящий в поддержании воды на уровне  $L_0$  в водо-паропроводе парогенератора, как указывалось ранее, характеризуется некой периодичностью, для простоты его можно описать гармонической функцией вида:  $L = L_0 + l \cdot \cos(\omega_0 t)$ , где  $\omega_0 = \pi/\tau$ ;  $t = k\tau$ ;  $k = 1, 2, 3, \dots, N$ ;  $\tau = l/\bar{v}$ ;  $\bar{v} = \sqrt{2P_{вд}/\bar{\rho}_в(T)}$ ;  $P_{вд}$  – давление воды при ее подаче в водо-паропровод ( $P_{вд} \approx 6,1 - 6,4$  МПа);  $\bar{\rho}_в(T)$  – усредненное значение плотности воды (рис. 3) так, что при нечетных  $k = 1, 3, \dots$ ,  $L = L_0 - l$ , а при четных  $k = 2, 4, \dots$ ,  $L = L_0 + l$ .

Полагая, что трещина, в первую очередь, может возникнуть на стенке трубы парогенератора толщиной  $\delta$ , непосредственно в рассматриваемой области, тогда сумма проекций на ось ОХ внешних радиальных сил  $F_x$ , действующих на разрыв в области щели, совместно с силами температурных напряжений, возникающих в этой области, должна удовлетворять второму закону Ньютона (1):

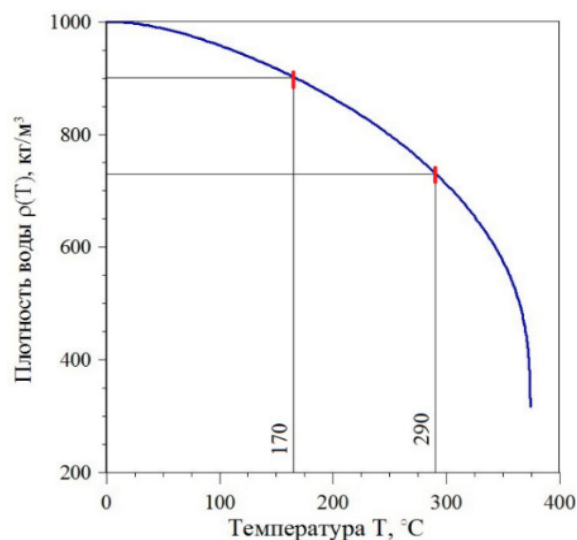


Рисунок 3. Зависимость плотности воды  $\rho(T)$  от температуры (область кривой между метками аппроксимируется для удобства вычислений параболой)

Figure 3. Dependence of water density  $\rho(T)$  on temperature. The area of the curve between the marks is approximated by a parabola for the convenience of calculations

$$ma = F_x - F_{\sigma}, \quad (1)$$

где  $m = \rho_{ш} \delta l \pi (R_0 + R_1)$  – эффективная масса участка трубы, в которой возникают микротрещины;

$a = d^2 l / dt^2$  – ускорение, с которым происходит ее образование, т.е. изменяется ее размер;

$$F_x = \sum_0^{\pi/2} (F_{\pi} + F_{ак}) \cdot \cos \varphi d\varphi = 4(F_{\pi} + F_{ак}) - \text{про-}$$

екция внешних радиальных сил на ось ОХ;

$$F_{\sigma}(T) = \delta l \cdot \sigma_T [T(r, \cos[\omega_0(t - \tau')])] - \text{внутрен-}$$

ние силы, возникающие в результате изменения температурного режима в водо-паропроводе парогенератора, и характеризующие изменения напряжений  $\sigma_T$  в металле трубы;

$$T(r, \cos[\omega_0(t - \tau')]) - \text{распределение температу-}$$

ры по толщине паро-трубопровода, которое необходимо определить. Последнее обусловлено зависимостью коэффициента теплопроводности  $\lambda(T)$ , теплоемкости  $C(T)$  и модуля упругости металла, из которого изготовлены теплообменные трубки парогенератора, от температуры.

Зависимость предельных напряжений, возникающих в металлических изделиях из стали соответствующих марок, при механических нагрузках, как функции температуры приведена на рисунке 4. Представленную линейную зависимость в диапазоне температур  $T_1 \leq T \leq T_2$  °C, где  $T_1 = 20$ ,  $T_2 = 375$  °C, можно аппроксимировать выражением (2):

$$\sigma_T(T) = \sigma_T(T_1) + \frac{\sigma_T(T_1) - \sigma_T(T_2)}{(T_2 - T_1)} T_1 - \frac{\sigma_T(T_1) - \sigma_T(T_2)}{(T_2 - T_1)} T \quad (2)$$

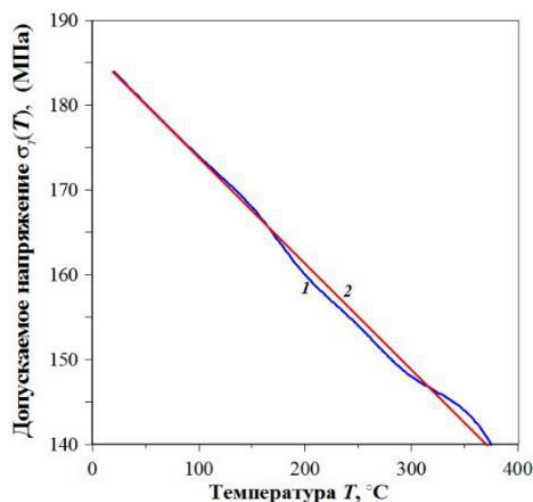


Рисунок 4. Зависимость допускаемого напряжения на изделии из стали марки 12X18H10T от температуры: 1 – зависимость, построенная по данным таблицы работы в ссылке [8], 2 – аппроксимация зависимости линейной функцией

Figure 4. Dependence of the allowable stress on the product from steel grade 12Cr18Ni10T on temperature: 1 – dependence plotted according to the data of the table of work [8], 2 – approximation of dependence by a linear function

Поскольку ранее мы определили, что температурный режим, выделенной области парогенератора, имеет гармонический характер, то силы, возникающие в результате изменения температурных напряжений на трубке парогенератора будут, очевидно, также носить подобный характер, которые, как и время запаздывания  $\tau'$  ответной реакции материала трубки парогенератора на температурное возмущение, необходимо уточнить. Время запаздывания  $\tau'$  можно оценить, используя среднее значение коэффициента диффузии  $\bar{D}_0$ , толщину  $\delta$  водо-паропровода и простое соотношение  $\tau' = \delta^2 / \bar{D}_0$ , где  $\bar{D}_0$  – усредненный коэффициент диффузии по температуре для соответствующего металла, (см. табл. 1). При  $\delta = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м  $\tau'$  составит 0,491 с, поэтому, рассматривая устоявшийся процесс (при больших  $t$ , исключающих переходные процессы), величиной  $\tau'$  можно пренебречь. В этом случае уравнение (1) можно переписать в виде выражения (3):

$$\rho_{\text{пр}} \delta l \pi (R_1 + R_2) \frac{d^2 l}{dt^2} = 8 \pi R_1 l (P_{\text{п}} + P_{\text{ак}}) - \delta l \cdot \sigma_T [T(r, \cos[\omega_0 t])] \quad (3)$$

в котором функция температурных напряжений  $\sigma_T [T(r, \cos[\omega_0 t])]$ , возникающих в металле трубки водо-паропровода, и будет определять гармонический характер температурных напряжений в выделенной области парогенератора. Чтобы определить вид этой функции необходимо найти решение уравнения теплопроводности участка цилиндрической трубы для  $l \in \Delta L_0$  при условии  $2R_1 \ll \Delta L_0$ , т.е. решить уравнение вида (4):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (4)$$

где  $D(T) = \lambda(T) / [\rho \cdot C(T)]$ ,  $[m^2/c]$  – коэффициент диффузии тепла в металле трубки парогенератора, с граничными условиями в выражениях (5), (6):

$$T(r, t)|_{r=R_0} = T_0, \quad (5)$$

$$T(r, t)|_{r=R_1} = T_{\text{сп}} - \Delta T \cos(\omega_0 t); \quad (6)$$

и начальным условием в выражении (7):

$$T(t, r)|_{t=0} = T_{\text{сп}} - \Delta T, \quad (7)$$

где  $T_0$  – температура теплоносителя;

$\Delta T$  определяется половиной максимальной разности температур пара  $T_{\text{п}}$  и воды  $T_{\text{в}}$ :

$$\Delta T = (T_{\text{п}} - T_{\text{в}}) / 2;$$

$$T_0 = 300, T_{\text{п}} = 290, T_{\text{сп}} = 230; T_{\text{в}} = 170^\circ\text{C}.$$

Усредняя коэффициент диффузии  $D(T)$  по диапазону температур  $100 \leq T \leq 300^\circ\text{C}$  по формуле  $\bar{D}_0 = \sum D^2(T_i) T_i / D(T_i) T_i$ ,  $T_i = 100, 200, 300$ , находим, что крайние значения  $D(T)$  из указанного диапазона отличаются не более, чем на 6%, а среднее значение составляет  $\bar{D}_0 = 4,581 \cdot 10^{-6} m^2/c$ . Полученные данные позволяют констатировать, что температурная зависимость коэффициента диффузии слабо выражена, что и позволяет считать  $D(T)$  постоянной величиной равной ее среднему значению. Последнее позволяет переписать уравнение (1) в виде уравнения (8):

$$\frac{dT}{dt} = \Delta T, \quad (8)$$

где оператор  $\Delta = \frac{\bar{D}_0}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$ , с граничными и

начальными условиями в выражениях (5)–(7), что позволит существенно упростить решение полученного уравнения. Решение уравнения (8) будем искать в виде уравнения (9):

$$T(r, t) = W(r) + T'(r, t), \quad (9)$$

<sup>2</sup> ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Приложение 1. Допускаемые напряжения для разных видов сталей. – Режим доступа: <https://zavod-rezervuar.ru/proektirovshhiku/spravochnaya-informacziya-gost-snipy-pb/gost-14249-89-sosudy-i-apparaty-normy-i-metody-rascheta-na-prochnost/prilozhenie-1/> (дата обращения: 16.09.2023).

где для функции  $W(r)$  (с безразмерной переменной  $r/R_0$ ) ставится задача, выражения (10), (11), (12):

$$\Delta W = 0, \quad (10)$$

$$W(r)|_{r=R_0} = T_0, \quad (11)$$

$$W(r)|_{r=R_1} = T_{cp} - \Delta T \cos(\omega_0 t). \quad (12)$$

Для функции  $T'(r, t)$  задача ставится следующим образом в формуле (13):

$$\Delta T' = \frac{\partial T'}{\partial t}, \quad (13)$$

с граничными и начальными условиями, выражения (14), (15), (16):

$$T'(r, t)|_{r=R_0} = 0, \quad (14)$$

$$T'(r, t)|_{r=R_1} = 0, \quad (15)$$

$$T'(r, t)|_{t=0} = (T_{cp} - \Delta T) - W(r)|_{t=0}. \quad (16)$$

Решение уравнения (10) имеет вид выражения (17):

$$W = C_1 \ln r + C_2, \quad (17)$$

а решение задачи (10) – (12) после подстановки граничных значений (11), (12) определится выражением (18):

$$W(r) = \frac{T_0 \ln(r/R_1) - [T_{cp} - \Delta T \cos(\omega_0 t)] \ln(r/R_0)}{\ln(R_0/R_1)}, \quad (18)$$

$$W(r)|_{t=0} = \frac{T_0 \ln(r/R_1) - [T_{cp} - \Delta T] \ln(r/R_0)}{\ln(R_0/R_1)}$$

Для решения задачи (13)–(16) используем метод разделения переменных [7, 8], представляя функцию  $T'(r, t)$  в виде произведения двух функций  $U(r)$  и  $V(t)$ , и подставляя в уравнение (13), получим выражение (19):

$$U \frac{dV}{dt} = V \frac{\bar{D}_0}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right). \quad (19)$$

Для дальнейшего решения приведем полученное уравнение (19) к безразмерным переменным. Для чего обе части последнего уравнения умножим на ранее введенный параметр  $\tau = \Delta L_0 / \bar{v}$ , представляющий собой характерное время, необходимое для вытеснения пара водой на расстояние (длину  $\Delta L_0$ ), движущейся в водопроводе со скоростью  $\bar{v}$ , правую часть, дополнительно, умножим и разделим на  $R_0^2$  а выражение в

круглых скобках правой части этого уравнения умножим и разделим на  $R_0$ . Тогда в левой части мы будем иметь безразмерное время  $t' = t/\tau$ , а в правой вместо размерного  $r$ , будем иметь дело с безразмерным –  $r' = r/R_0$  и в место коэффициента  $\bar{D}_0$  будем использовать безразмерный коэффициент равный  $\bar{D} = \bar{D}_0 \cdot \tau / R_0^2$ . Кроме того, удобства ради, будем считать, что переменные, (опуская в  $r'$  штрих) в нашем уравнении безразмерные, а безразмерный коэффициент диффузии равен  $\bar{D}$ . Тогда, разделяя переменные  $U$  и  $V$ , получим:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\bar{D}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) = -\mu \cdot$$

Приравнивая отношение каждой из дробей к постоянной величине  $-\mu$ , получаем два уравнения, для которых будем искать нетривиальные решения, т.е. не тождественный нуль, выражения (20), (21):

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\mu r}{\bar{D}} U = 0, \quad (20)$$

$$\frac{dV}{dt} + \mu V = 0. \quad (21)$$

Проводя дифференцирование в уравнении (20), получим выражение (22):

$$r \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\mu}{\bar{D}} r U = 0. \quad (22)$$

Решение уравнения (22) имеет вид выражения (23):

$$U(r) = C_1 J_0(r\sqrt{b}) + C_2 Y_0(r\sqrt{b}), \quad (23)$$

где  $b = \mu/\bar{D}$ ;  $J_0$ ,  $Y_0$  – линейно независимые функции Бесселя (Ф.Б.) нулевого порядка [9], а  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные.

Важные свойства Функций Бесселя нулевого порядка определяются тем, что  $J_0(x)$  является ограниченной функцией и  $J_0(0) = 1.0$ , а функция  $Y_0(x)$  – неограниченной ( $Y_0(0) = -\infty$ ) [10]. Кроме того, каждая из функций  $J_0(x)$ ,  $Y_0(x)$  имеет бесконечное множество действительных нулей, значения которых определяют собственные значения (с.з.) функции. Функции  $J_0(x)$ ,  $Y_0(x)$  ортогональны с весом  $x$ , т.е.  $\int_0^l x J_0\left(\frac{\alpha}{l}x\right) J_0\left(\frac{\beta}{l}x\right) dx = 0$  при  $\alpha \neq \beta$  и оба числа являются корнями уравнения  $J_0(\gamma) = 0$ , т.е. собственными значениями [8]. Приближенные значения нулей функции Бесселя  $J_0(\gamma_m) = 0$  могут быть вычислены по формуле (24) [9]:

$$\gamma_m = 2.4 + 3.13(m-1), \quad (24)$$



где  $m = 1, 2, 3, \dots$ , максимальная погрешность, которая составляет 0,2 %.

Учитывая область исследования (тонкую металлическую трубку, с относительной толщиной  $\delta = [R_0 - R_1]/R_0$ ) и особенности функций  $J_0(x)$ ,  $Y_0(x)$ , уравнение (23) можно переписать для безразмерной переменной  $\delta$ . В этом случае эта безразмерная переменная  $\delta$  будет изменяться (с учетом представления безразмерного радиуса  $r' = r/R_0$ ) от  $\delta_1 = 0$ :  $(R_0 - R_0)/R_0$  до  $\delta_2 \neq 0$ :  $(R_0 - R_1)/R_0$ . В таком случае мы имеем два уравнения (25) и (26), удовлетворяющих граничным условиям:

$$0 = C_1 J_0(0\sqrt{b}) + C_2 Y_0(0\sqrt{b}), \quad (25)$$

$$0 = C_1 J_0(\delta\sqrt{b}) + C_2 Y_0(\delta\sqrt{b}). \quad (26)$$

Используя свойства функций  $J_0(x)$ ,  $Y_0(x)$ , и, требуя ограниченности и не тривиальности решения, полагаем в уравнении (25)  $C_2 = 0$ , откуда следует, что  $C_1$  не должен быть равен нулю ( $C_1 \neq 0$ ). Тогда из уравнения (26) и вытекающего из него условия  $J_0(\delta\sqrt{b}) = 0$ , находим собственные значения  $\mu_m$ , выражение (27):

$$\mu_m = (\bar{D}/\delta^2) \gamma_m^2, \quad (27)$$

где величина  $\gamma_m$  определена формулой (24).

Собственным значениям (27) отвечают собственные функции, выражение (28):

$$U_m(r) = J_0\left(\frac{(R_0 - r)}{R_0} \sqrt{\frac{\mu_m}{D}}\right), \quad (28)$$

где размерное значение  $r$  удовлетворяет неравенству  $R_1 \leq r \leq R_0$ .

Решение уравнения (21) представляет собой выражение (29):

$$V(t) = B_m \exp(-\mu_m t), \quad (29)$$

где  $B_m$  – постоянная, а  $\mu_m$  определено формулой (27).

Записывая функцию  $T'(r, t)$  в виде произведения двух функций  $U(r)$  и  $V(t)$ , решение задачи (13) – (14) может быть представлено в виде выражения (30):

$$T'(r, t) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m J_0\left(\frac{(R_0 - r)}{R_0} \sqrt{\frac{\mu_m}{D}}\right) \exp(-\mu_m t), \quad (30)$$

где  $\mu_m$  определено выражением (27) при  $m = 1, 2, 3, \dots$ . Для вычисления постоянных  $B_m$  воспользуемся начальным условием (28) и свойством ортогональности с. ф. Для чего представим выражение  $[(T_{cp} - \Delta T) - W(r)]_{t=0}$  в граничном условии (16) в виде разложение по с. ф. (28) краевой задачи при  $t = 0$ , т.е. представим в виде (31):

$$\begin{aligned} &[(T_{cp} - \Delta T) - W(r)]_{t=0} = \\ &= \sum_{m=1}^{\infty} B_m J_0\left(\frac{(R_0 - r)}{R_0} \sqrt{\frac{\mu_m}{D}}\right) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right), \end{aligned} \quad (31)$$

где  $x = (R_0 - r)/R_0$  и  $\delta = (R_0 - R_1)/R_0$ , а  $\gamma_m$  определяется формулой (24). Далее умножим обе части уравнения (31) на произведение  $x \cdot J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_n\right)$  и проинтегрируем по интервалу  $[0, \delta]$ , тогда левая часть будет представлять выражение:

$$\begin{aligned} &[(T_{cp} - \Delta T) - W(x)]_{t=0} = \quad , \quad \text{а вместо} \\ &= [T_{cp} - T_0 - \Delta T] \cdot [1 + \ln(1 - x)/\ln(R_0/R_1)] \end{aligned}$$

выражения (31) получим выражение (32):

$$\begin{aligned} &[(T_{cp} - \Delta T) - T_0] \cdot \left\{ \int_0^{\delta} x J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_n\right) dx + \frac{\int_0^{\delta} x \ln(1 - x) J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_n\right) dx}{\ln\left(\frac{R_0}{R_1}\right)} \right\} = \\ &= \int_0^{\delta} x J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_n\right) \left[ \sum_{m=1}^{\infty} B_m J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) \right] dx \end{aligned} \quad (32)$$

С учетом свойства ортогональности с.ф.  $\left( \int_0^{\delta} x J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_n\right) dx = 0, \text{ при } \gamma_m \neq \gamma_n \right)$  и при  $\gamma_m = \gamma_n$  в правой части получаем квадрат нормы, выражение (33):

$$\left\| J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) \right\|^2 = \int_0^{\delta} x J_0^2\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) dx = \frac{\delta^2}{2} \{ [J_0'(\gamma_m)]^2 + [J_0^2(\gamma_m)] \}, \quad (33)$$

где  $J_0'(x) = -J_1(x)$ ,  $m = 1, 2, 3, \dots$ , а в левой – выражение (34) [11]:

$$\int_0^{\delta} x J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) dx = \left( \frac{\delta}{\gamma_m} \right)^2 \cdot \gamma_m J_1(\gamma_m). \quad (34)$$

Интеграл от второго слагаемого в левой части выражения (32) (в фигурных скобках) вычислялся численно, что позволяет определить коэффициенты  $B_m$  в виде выражения (35):

$$B_m = \frac{[(T_{cp} - \Delta T) - T_0] \cdot \left\{ \int_0^{\delta} x + \frac{x \cdot \ln(1 - x)}{\ln(R_0/R_1)} J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) dx \right\}}{\left\| J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) \right\|^2}, \quad (35)$$

Таким образом, решение задачи (13)–(16) представляет собой бесконечную сумму вида (30) с коэффициентами  $B_m$ , определяемыми формулой (35), а решение задачи (4)–(7) представляет собой сумму решений вида (18) и (30) с коэффициентами  $B_m$ , определяемыми формулой (35) при  $\mu_m$ , вычисляемых по формуле (27), а  $\gamma_m$  – (24).

$$T(r, t) = \frac{T_0 \ln\left(\frac{r}{R_1}\right) - [T_{cp} - \Delta T \cos(\omega_0 t)] \ln\left(\frac{r}{R_0}\right)}{\ln\left(\frac{R_0}{R_1}\right)} + \sum_{m=1}^{\infty} B_m J_0\left(\frac{(R_0 - r)}{R_0} \sqrt{\frac{\mu_m}{D}}\right) \exp(-\mu_m t) \quad (36)$$

где коэффициенты  $B_m$  определяются выражением (35), при  $\delta = (R_0 - R_1)/R_0$ , с квадратом нормы Ф.Б. нулевого порядка  $J_0(x)$  вида:

$$\left\| J_0\left(\frac{x}{\delta} \gamma_m\right) \right\|^2 = \frac{\delta^2}{2} \{ [J_0'(\gamma_m)]^2 + J_0^2(\gamma_m) \} = \frac{\delta^2}{2} \{ [J_1(\gamma_1)]^2 + [J_0^2(\gamma_m)] \}$$

При больших  $x$  ( $x \gg 20$ ) для  $J_0(x)$  и  $J_1(x)$  целесообразно использовать асимптотические разложения для этих функций:

$$J_0(x) = (\cos(x) + \sin(x)) / \sqrt{\pi x};$$

$$J_1(x) = (\sin(x) - \cos(x)) / \sqrt{\pi x}, [9].$$

Решение задачи (4)–(7), определяемое формулой (36), представляет собой температурное распределение, возникающее по толщине трубки водопаропровода в различные моменты времени, и, как следует из решения, также является гармонической функцией. Следует отметить, что в формуле (36) первое слагаемое играет доминирующую роль. Соответствующие картины температурных распределений по толщине трубки в моменты времени  $t = 0$ ,  $t = \tau/2$  и  $t = \tau$ , в которые  $\cos(\omega_0 t)$  в первом слагаемом формулы (36) будет соответственно равен 1, нулю и минус 1, приведены на рисунке 5, на котором точка сходимости кривых соответствует температуре внешней поверхности парогенератора. Кроме того, решение (36) с учетом выражения (2), описывающего зависимость напряжений в трубке парогенератора от температуры, позволяет получить окончательное выражение для сил упругих напряжений, возникающих в паропроводе парогенератора. Подставляя в формулу (2) выражение (36), определяющее температурное поле по толщине  $\delta$  паро-трубопровода, мы, таким образом, находим температурные напряжения, возникающие в металле водопаропровода при заполнении трубки паром или водой, и обусловленные этими напряжениями механические силы  $F_\sigma(r, T)$ , на которые указывали ранее в формулах (1), (3):

$$F_\sigma(r, T) = \delta l \cdot \left[ \frac{\sigma_T(T_1) + \frac{\sigma_T(T_1) - \sigma_T(T_2)}{(T_2 - T_1)} T_1 - \frac{\sigma_T(T_1) - \sigma_T(T_2)}{(T_2 - T_1)} T(r, t)}{(T_2 - T_1)} \right],$$

где  $T(r, t)$  определено формулой (36).

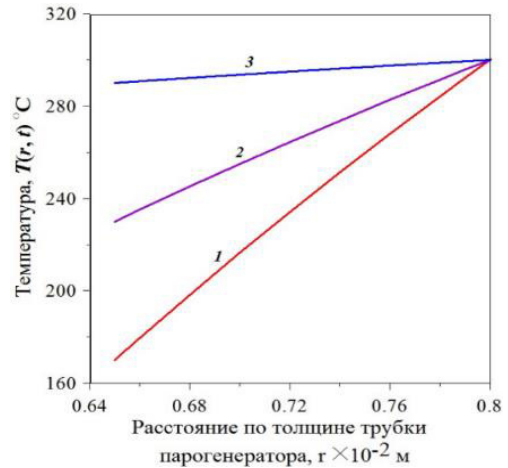


Рисунок 5. Распределение температуры по толщине металла трубки парогенератора в различные моменты времени периода колебаний  $\tau$ : в момент времени  $t = 0$ , (1);  $t = \tau/2$ , (2);  $t = \tau$ , (3)

Figure 5. Temperature distribution along the thickness of the steam generator tube metal at different moments of the oscillation period  $\tau$ : at time  $t = 0$ , (1);  $t = \tau/2$ , (2);  $t = \tau$ , (3)

Графики распределения сил упругих напряжений, возникающих по толщине металла трубки парогенератора, приведены на рисунке 6. Точка сходимости кривых соответствует температуре на внешней поверхности парогенератора  $T(r, t) = 300^\circ\text{C}$ .

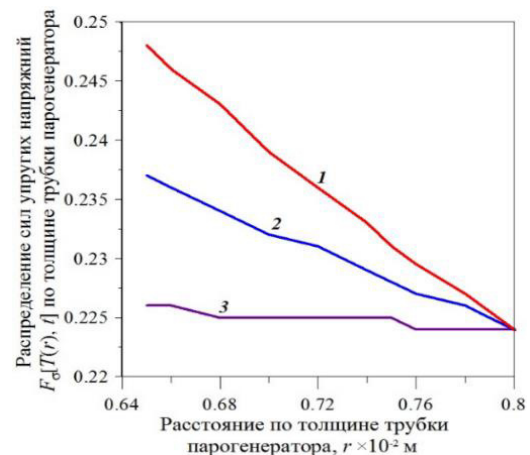


Рисунок 6. Распределение сил упругих напряжений, возникающих по толщине трубки парогенератора в различные моменты времени периода колебаний  $\tau$ : в момент времени  $t = 0$ , (1);  $t = \tau/2$ , (2);  $t = \tau$ , (3); точка сходимости кривых соответствует температуре на внешней поверхности

Figure 6. Distribution of elastic stress forces occurring along the thickness of the steam generator tube at different moments of the oscillation period  $\tau$ : at time  $t = 0$ , (1);  $t = \tau/2$ , (2);  $t = \tau$ , (3); the convergence point of the curves corresponds to the temperature at the outer surface

Далее рассмотрим силы, обусловленные действием пара, образующимся в паропроводе в результате испарения воды, поступающей в водопаропровод при передаче тепла от теплоносителя первого контура. Рассматривая давление пара в области его образования и распространения по паропроводу парогенератора, следует также учитывать и акустические эффекты

в паре в виде возможного дополнительного акустического давления в указанных областях [12]. Акустическое воздействие на паропровод может быть связано с возникновением пульсирующих сил, вызываемых потоком пара в водо-паропроводе парогенератора, имеющим периодический характер. Эксплуатационные вибрации паропроводов на АЭС с ВВЭР-1000 наблюдались с самого начала эксплуатации данных блоков. Измерениями было доказано, что источником эксплуатационных вибраций являются пульсации давления в паропроводах, которые имеются в каждом парогенераторе. Это позволяет сформулировать задачу определения пульсации давления и описать их уравнением второго порядка, которое имеет волновую природу [13, 14]. Однако, как и при решении задачи определения температурного поля (4)–(7), решение настоящей задачи (37) будем искать лишь для  $l \in \Delta L_0$  при выполнении условия  $2R_1 \ll \Delta L_0$ , предполагая изотропию среды по азимуту за счет осевой симметрии объекта, что позволит существенно упростить решение:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial P_{\text{ак}}}{\partial r} \right) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P_{\text{ак}}}{\partial t^2} = 0, \quad (37)$$

где  $c$  – скорость звука в среде (насыщенном паре)<sup>3</sup>.

Для задания граничного условия при  $r = R_1$  воспользуемся граничным условием (6) и уравнением Клапейрона-Менделеева для давления пара с учетом его зависимости от температуры:  $P_{\text{п}} = \rho(T_{\text{п}}) R T_{\text{п}}$ , где  $\rho(T)$  – плотность пара как функция температуры (рис. 7)<sup>4</sup>;  $R$  – постоянная Больцмана ( $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ );

$T_{\text{п}}(r, t)|_{r=R_1} = T_{\text{ср}} - \Delta T \cos(\omega_0 t)$  [°K] из условия (6), выражение (38):

$$P_{\text{ак}}(r, t)|_{r=R_1} = \rho(T_{\text{п}}(r, t)|_{r=R_1}) \cdot R \cdot T_{\text{п}}(r, t)|_{r=R_1}. \quad (38)$$

Граничное условие при  $r = 0$  определяем, исходя из осевой симметрии задачи, выражение (39):

$$\left. \frac{\partial P_{\text{ак}}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (39)$$

которое означает, что в центре трубы с паром давление пара будет либо постоянным, либо всегда иметь

место экстремум. Начальное условие (40) задаем также, используя уравнение Клапейрона-Менделеева при  $T_{\text{п}}(r, t)|_{t=0} = T_{\text{ср}} - \Delta T$ , выражение (40):

$$P_{\text{ак}}(r, t)|_{t=0} = \rho(T_{\text{п}}(r, t)|_{t=0}) \cdot R \cdot T_{\text{п}}(r, t)|_{t=0}. \quad (40)$$

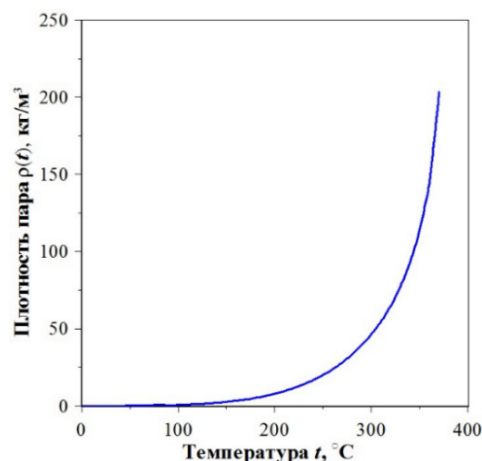


Рисунок 7. Зависимость плотности насыщенного пара как функции температуры

Figure 7. Dependence of saturated vapor density as a function of temperature<sup>5</sup>

Для дальнейшего решения задачи приведем уравнение (37) к безразмерному виду, для чего первое слагаемое в (40) умножим и разделим на  $R_1^3$ , а второе – умножим и разделим на  $\tau^2$  и, вводя безразмерные переменные  $r' = r/R_1$ ,  $t' = t/\tau$ , получим уравнение:  $\frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left( r' \frac{\partial P_{\text{ак}}}{\partial r'} \right) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P_{\text{ак}}}{\partial t'^2} = 0$ , в котором  $c_0 = c \cdot (\tau/R_1)$ . Далее, опуская штрих, получаем уравнение (41) в безразмерных переменных:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial P_{\text{ак}}}{\partial r} \right) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P_{\text{ак}}}{\partial t^2} = 0, \quad (41)$$

с граничным условием (42):

$$P(r, t)|_{r=1} = \rho(T_{\text{п}}(r, t)|_{r=1}) \cdot R \cdot T_{\text{п}}(r, t)|_{r=1}. \quad (42)$$

Кроме того, дополнительно потребуем условия обращения в нуль производной от давления  $P(r, t)$  по времени при  $t = 0$ , предполагая отсутствие резких переходных процессов, выражение (43):

$$\left. \frac{\partial P_{\text{ак}}(r, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0. \quad (43)$$

При решении задачи (37) – (40), (42), (43) искомую функцию  $P_{\text{ак}}(r, t)$  представляем в виде суммы двух функций  $U(r, t)$  и  $W(r)$ :  $P_{\text{ак}}(r, t) = U(r, t) + W(r)$ . Для  $W(r)$  ставится задача (44), (45), (46):

<sup>5</sup> Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. – Мн.: Современная школа, 2005. – 608 с.

<sup>3</sup> В жидкостях и твердых телах в обычных условиях скорость звука падает при увеличении температуры. Вода – исключение: в ней скорость звука растет с повышением температуры до, примерно, 74°C и только при больших температурах начинает падать [10].

<sup>4</sup> Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. – URL: <https://base.garant.ru/4188851/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> (дата обращения: 16.09.2023).



$$\Delta W = 0; \quad (44)$$

$$\left. \frac{\partial W}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad (45)$$

$$W(r)|_{r=1} = \rho(T_n(r, t)|_{r=1}) \cdot R \cdot T_n(r, t)|_{r=1}, \quad (46)$$

где  $T_n(r, t)|_{r=1} = T_{cp} - \Delta T \cos(\omega_0 t)$ .

Для функции  $U(r, t)$  формулируется задача (47), (48), (49):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0; \quad (47)$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad (48)$$

$$U(r, t)|_{r=1} = 0, \quad (49)$$

с начальными условиями (50), (51):

$$\left. \frac{\partial U(r, t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0. \quad (50)$$

$$U(r, t)|_{t=0} = \rho(T_n(r, t)|_{t=0}) \cdot R \cdot T_n(r, t)|_{t=0} - W(r)|_{t=0}, \quad (51)$$

где  $T_n(r, t)|_{t=0} = (T_{cp} - \Delta T)$ .

Условие (50) физически может означать, что давление пара в рассматриваемый момент времени ( $t = 0$ ) является либо постоянным, либо имеет экстремальное значение.

Решение уравнения (44) имеет вид (17), а требования ограниченности решения и удовлетворения граничным условиям (45), (46), приводит к выражению (52):

$$W(r) = \rho(T_n(r, t)|_{r=1}) \cdot R \cdot T_n(r, t)|_{r=1}, \quad (52)$$

т.е.  $W(r)$  не зависит от  $r$ , но изменяется со временем как  $T_n(r, t)|_{r=1}$ . Таким образом при выполнении условий (48) – (51) следует, что  $U(r, t) \equiv 0$ , а  $P_{ак}(r, t) = W(r) = \rho(T_n(r, t)|_{r=1}) \cdot R \cdot T_n(r, t)|_{r=1}$ , т.е. давление  $P_{ак}(r, t)$  определяется только давлением пара, определяемым уравнением Клапейрона-Менделеева.

### Обсуждение результатов

Таким образом, в рамках рассматриваемой математической модели работы парогенератора решение задач (4)–(7), (8)–(36), показывает, что температурное распределение, возникающее по толщине металлической оболочки паропровода парогенератора, при заданном периодическом режиме его работы, существенно различается даже в течение одного периода

колебаний  $\tau$  сред пар-вода (см. рис. 5). Изменение температурного режима переходной области пар-вода обуславливает возникновение по толщине металлической оболочки паропровода парогенератора значительных упругих напряжений (см. рис. 6), обусловленных температурными изменениями, также связанными с периодическим характером его работы. Причем, как это следует из рисунка 6, основные температурные напряжения в металле паропровода возникают на его внутренней стенке, поскольку в этой области наблюдается значительная разность температур (см. рис. 5), т.е. возникновение трещин, через которые в паропровод могут проникать радионуклиды из теплоносителя, начинается с внутренней стороны паропровода. В результате продолжительной эксплуатации паропровода, очевидно, наступает усталость металла, что и приводит к образованию трещин, а общее внутреннее давление пара лишь усиливает возникающий эффект. Из рисунка 6, в частности, следует, что в части паропровода, расположенной ниже и выше от исследуемой области ( $x \sim L_0$ ), температурные напряжения в паропровode будут слабо выражены, поскольку отличие температуры внешней и внутренней поверхностей паропровода будет либо незначительным при  $x \gg L_0$  либо будет постоянно, т.е. не будет изменяться во времени при  $x \ll L_0$ . Напротив, решение задач (37)–(40), (41)–(51), показывает, что давление пара, возникающего в паропровode при испарении воды, описывается уравнением Клапейрона-Менделеева и только этот характер давления может оказывать дополнительный эффект в образовании трещин в паропровode и возникновении протечки парогенератора.

### Оценка длины микротрещин, возникающих в паропровode парогенератора

Возвращаясь к вопросу оценки длины микротрещины, которая была определена уравнением (3), подведем некоторые итоги нашего исследования, и внесем определенные коррективы, которые позволят нам получить окончательную оценку рассматриваемого параметра – длины микротрещины в паропровode парогенератора. Таким образом, было получено, что основным механизмом образования трещин в паропровode парогенератора являются механические напряжения металла паропровода, вызываемые резкими температурными колебаниями в области паропровода, в которой устанавливается равновесное давление пара и воды [3–6]. Температурное распределение по толщине трубки парогенератора в различные моменты времени периода колебаний, т.е. в моменты времени периодического заполнения водой области  $\Delta L_0$ , в которой устанавливается равновесное давления пара, описывается формулой (36) и приводится на рисунке 5. Температурное распределение напряжений и сил, возникающих в металле трубки парогенератора, в рамках рассматриваемой модели возникновения эффекта, описывается формулой (1).

Для оценки влияния акустического давления, возникающего в паре паропровода, рассматривалась задача, определения пульсаций давления, которая описывается уравнением второго порядка, имеющего волновую природу (37)–(40). В рамках рассматриваемого

мой модели (41)–(51) было показано, что в паропроводе в исследуемой области пульсаций давления, имеющих высокочастотный характер, не возникает. На формирование трещин в паропроводе, как показало решение задачи, существенное влияние оказывает периодическое изменение температуры в области равенства давлений пара и воды ( $\Delta L_0$ ) и общее давление пара, которое описывается известной зависимостью Клапейрона-Менделеева  $P_n(r, t) = \rho(\bar{T}_n)RT_n(r, t)|_{r=1}$ , и в силу циклического характера работы парогенератора в рассматриваемой области  $\Delta L_0$  кроме температуры также зависит и от времени.

Таким образом, результаты анализа позволяют переписать уравнение (3), учитывая лишь зависимость температуры пара внутреннего давления в паропроводе от времени в виде гармонической функции  $[\cos(\omega_0 t)]$  и пространственно-временную зависимость сил, связанных с температурными напряжениями, возникающими по толщине паро-водопровода парогенератора в рассматриваемой области, уравнение (53):

$$\rho_{\text{пр}} \delta l \pi (R_1 + R_2) \frac{d^2 l}{dt^2} = 8\pi R_1 l P_n(r, t)|_{r=1} - \delta l \cdot P_\sigma(r, t). \quad (53)$$

Представляя  $F_\sigma(r, t)$  в виде:

$$F_\sigma(r, T) = \delta l \cdot [a - b \cdot T(r, t)],$$

$$b = (\sigma_T(T_1) - \sigma_T(T_2)) / (T_2 - T_1),$$

$$a = \sigma_T(T_1) + \frac{\sigma_T(T_1) - \sigma_T(T_2)}{(T_2 - T_1)} T_1; \text{ и, ограничиваясь в}$$

формуле (36) первым слагаемым

$$T(r, t) \approx (T_0 \ln(r/R_1) - [T_{\text{cp}} - \Delta T \cos(\omega_0 t)] \ln(r/R_0)) / \ln(R_0/R_1)$$

$$\text{и } T(r, t) = c + d \cdot \cos(\omega_0 t),$$

$$\text{где } c = (T_0 \cdot \ln(r/R_1) - T_{\text{cp}} \cdot \ln(r/R_1)) / \ln(R_0/R_1);$$

$$d = \Delta T \cdot \ln(r/R_0) / \ln(R_0/R_1), \text{ уравнение (53), представим выражением (54):}$$

$$\frac{d^2 l(r, t)}{dt^2} = (A - B + C) + D \cdot \cos(\omega_0 t), \quad (54)$$

$$\text{где } A = \frac{8R_1 \cdot \rho_n(\bar{T})R}{\rho_{\text{пр}}(R_1 + R_0) \cdot \delta} \bar{T}_K;$$

$$B = \frac{a}{\rho_{\text{пр}} \pi (R_1 + R_0)};$$

$$C = \frac{b \cdot c}{\rho_{\text{пр}} \pi (R_1 + R_0)};$$

$$D = \left[ \frac{b \cdot d}{\rho_{\text{пр}} \pi (R_1 + R_0)} - \frac{8R_1 \cdot \rho_n(\bar{T})R}{\rho_{\text{пр}}(R_1 + R_0) \delta} \Delta T_K \right],$$

с нулевыми начальными условиями (55), (56):

$$l(r, t)|_{t=0} = 0, \quad (55)$$

$$\left. \frac{dl(r, t)}{dt} \right|_{t=0} = 0. \quad (56)$$

Условие (55) означает, что в начальный момент времени микротрещины отсутствуют, а условие (56) свидетельствует о том, что длина микротрещины является величиной постоянной. Решение уравнения описывается простым выражением:  $l(r, t) = [(A - B + C)/2]t^2 - (D/\omega_0^2) \cdot \cos(\omega_0 t) + Ft + G$ , коэффициенты которого  $F$  и  $G$  находят, используя начальные условия (55), (56):  $G = D/\omega_0^2$ ;  $F = 0$ . Если рассматривать ненулевое начальное условие (55), то длина щели будет увеличиваться. Таким образом, решение уравнения (54) при нулевых начальных условиях будет имеет вид (57):

$$l(r, t) = \frac{(A - B + C)}{2} t^2 + \frac{D}{\omega_0^2} \cdot (1 - \cos(\omega_0 t)). \quad (57)$$

Расчет длины микротрещины проводился для промежутка времени равном длительности периода колебаний вода-пар, возникающего при заполнении в паропроводе области  $\Delta L_0$  парогенератора той или иной средой,  $\tau = 2,26 \cdot 10^{-4}$  с и  $P_{\text{гр}} = 6,4$  МПа. Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2. Длина микротрещины в паропроводе парогенератора за период  $\tau/2$  и парогенератора  
Table 2. Microcrack length in the steam line of the steam generator for the period  $\tau/2$  and  $\tau = 2,3 \cdot 10^{-4}$ s

$L_s$ , м	$\Delta L_0$ , м	$l_{vr}(\tau/2)$ , м	$l_{vr}(\tau)$ , м
10	0,0205	0,004	0,031
20	0,024	0,006	0,042
35	0,027	0,008	0,056

Расчеты показывают, что длина<sup>6</sup> микротрещины  $l_{vr}$  за период колебаний  $\tau$  зависит от разности хода воды  $\Delta L_0$  (области захлестывания) в паропроводе парогенератора от 3,1 см до 5,3 см., т.е. оказывается больше в 1,5–2 раза рассматриваемой области  $\Delta L_0$ . Кроме того длина микротрещины существенно зависит от температуры и плотности пара  $\rho_n(L_0)$  в указанной области. Но зависимость длины микротрещины от времени  $t$ , если не учитывать возможный ее рост со временем, целесообразно рассматривать лишь за время периода колебаний  $\tau$ , тогда целое число, определяемое отношением времени эксплуатации парогенератора  $t$  к периоду колебаний  $K = [t/\tau]$ , даст оценку общего числа микротрещин, значение которого  $K_{\text{max}}$  и определит время работоспособности парогенератора. Кроме то-

<sup>6</sup> Трещины, наблюдающиеся чаще всего на наружной и внутренней поверхностях трубной заготовки или стальной трубы, располагаются в продольном направлении. Последнее связано с тем, что разрывающая сила в этом направлении больше, чем в поперечном, почти в два раза. – Режим доступа: <https://markmet.ru/defekty-stalei/prodolnye-treshchiny-razryvy> (дата обращения: 16.09.2023).

го, как указывалось ранее, температурные напряжения по толщине паропровода для областей, расположенных дальше от исследуемой области ( $x \gg L_0$ ) (кривую 3 на рис. 6), будут слабо выражены, поскольку температура на внешней и внутренней поверхностях паропровода будут мало отличаться (см. кривую 3 на рис. 5). Время  $t_{max}$  или число  $K_{max}$  может быть определено только экспериментально, основываясь на достижении в турбинном зале радиоактивного загрязнения при возникновении протечек в парогенераторе, при котором мощность дозы, создаваемая ИИ радионуклидов, вышедших с паром, будет соответствовать или превышать предельно допустимое значение мощности дозы для персонала, согласно нормам радиационной безопасности НРБ-99/2009 (см. постраничную ссылку 4).

### Влияние воздействия ионизирующего излучения

Несомненно, что омываемый теплоносителем первого контура парогенератор подвергается воздействию ионизирующего излучения, к видам которого, следует отнести  $\gamma$ -излучение продуктов активации, присутствующих в теплоносителе первого контура,  $\beta$ -излучение, возникающее, в основном, в результате комптоновского эффекта и фотоэффекта в среде теплоносителя и металле парогенератора и образование электронно-позитронных пар в результате одноименного эффекта. Воздействие ИИ на металл парогенератора приводит к ухудшению ряда его механических свойств и коррозионной стойкости. Быстрые частицы, проходя через металлические материалы, отдают значительную часть своей энергии в небольшой области решетки, вызывая плавление в микроскопических объемах.

Отвердевание этих объемов происходит чрезвычайно быстро, что приводит к образованию сильно напряженных участков. Они оказывают такое же действие на свойства металла, как и обычная закалка, а именно: увеличиваются твердость и прочность, но снижается пластичность и уменьшается плотность. Длина пробега заряженных частиц (электронов, позитронов) в металле незначительна, поэтому они создают повреждения лишь в поверхностном слое. Степень изменения свойств и число дефектов в металле при облучении зависит от суммарного потока частиц, температуры облучения и температуры рекристаллизации металла<sup>7</sup>.

При радиационном облучении кроме механических изменяются также химические и физические свойства материалов, например, повышается температура перехода в хрупкое состояние, увеличивается скорость коррозии. Суть последнего сводится к следующему. Для многих конструкционных реакторных материалов, коррозионной средой является вода, влажный или перегретый пар. В результате электро-

химическая коррозия<sup>8</sup> может сопровождаться химической. При облучении стойкость металлов в условиях химической коррозии снижается из-за разрушения поверхностных защитных пленок. Кроме того, при облучении происходит радиолиз воды: ее молекулы разрушаются и образуются ионы, атомы кислорода, водорода и группы ОН. Кислород окисляет металл, водород интенсивно внедряется в него «наводороживает» металл и, тем самым, охрупчивает, усиливая электрохимическое разрушение металла<sup>9</sup>, что и способствует условиям для образования трещин. Облучение аустенитных хромоникелевых сталей также усиливает их коррозию за счет выделения карбидов по границам зерен, которое существенно усиливается при облучении. Во влажном паре оно способствует развитию местных видов коррозии – межкристаллической, точечной, а также коррозионному растрескиванию: на рисунке 8 представлены зерна растрескивания с увеличением в 300 раз (а) и в 500 раз (б).

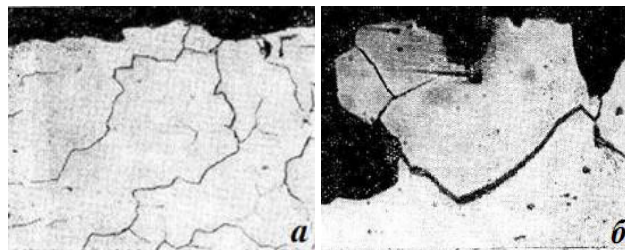


Рисунок 8. Микроструктура аустенитной нержавеющей стали, пораженной интеркристаллитной коррозией  
Figure 8. Microstructure of austenitic stainless steel affected by intergranular corrosion

Таким образом, при оценке формирования рассмотренного выше эффекта – образования трещин в парогенераторе необходимо в первую очередь учитывать периодические колебания системы вода-пар в парогенераторе, характеризующие формирование области, в которой периодически происходит замещение пара водой и наоборот. В этой области под действием указанных замещений в металлической оболочке парогенератора возникают как механические эффекты, обусловленные давлением пара в паропроводе, температурные, связанные с изменением внутренних напряжений в металле паропровода, которые способствуют возникновению трещин, через которые радионуклиды, растворенные в теплоносителе, омывающем паропровод, могут проникать в паропровод и выбрасываться с паром на турбину. При этом нельзя,

<sup>8</sup> В результате физико-химических процессов, возникающих при взаимодействии металла с омывающей его средой, может возникать процесс разрушения металла, который называют коррозией. Если коррозионный процесс сопровождается протеканием электрического тока, его называют электрохимической коррозией. Сущность электрохимической коррозии состоит в том, что при соприкосновении металла с электролитами создаются условия для возникновения на поверхности обратимых и необратимых электродов, разность потенциалов которых и обуславливает наличие коррозионного тока, который и характеризует эффект.

<sup>9</sup> См. постраничную ссылку 6.

<sup>7</sup> Влияние облучения на структуру и свойства материалов. Справочный материал. – Режим доступа: [https://studopedia.ru/12\\_66323\\_vliyanie-oblucheniya-na-strukturu-i-svoystva-materialov.html](https://studopedia.ru/12_66323_vliyanie-oblucheniya-na-strukturu-i-svoystva-materialov.html) (дата обращения: 16.09.2023)

очевидно, не учитывать и особенности воздействия ионизирующего излучения радионуклидов, растворенных в теплоносителе, благодаря которым ионизация сред (теплоноситель-парогенератор) вкупе с повышенной температурой приводит к ухудшению механических и коррозионных свойств парогенератора. Так же нельзя исключать и синергетический эффект, в результате которого суммарный эффект может оказаться значительно больше, чем просто сумма результатов воздействия от каждого в отдельности, однако для решения этих проблем должны привлекаться металлурги, химики, технологи и др., т.е. специалисты, занимающиеся вопросами разработки и создания парогенераторов.

### Оценка мощности вброса азота $^{16}\text{N}_7$ в паропровод парогенератора

Значительно продвинувшись в понимании механизма образования микротрещин в паротрубопроводе парогенератора, целесообразно уточнить величину мощности вброса  $P_v$  [Ки/с], представляющей собой величину активности радионуклида, поступающего в паропровод в единицу времени из теплоносителя первого контура в паропровод парогенератора, которая в работах автора [3–6] определялась на основе измерений эквивалентной мощности дозы, создаваемой радиоактивным азотом  $^{16}\text{N}_7$ , и массы пара, выходящих с паром на турбину. Суть оценки состояла в вычислении интеграла, представляющего аналитическое выражение эквивалентной мощности дозы, и этой же величины, измеряемой высокотемпературным  $\gamma$ -детектором [15], в момент времени прохождения пара по паропроводу  $\tau_n = L/\bar{v}_n$ , где  $L$  – длина паропровода;  $\bar{v}_n$  – средняя скорость переноса пара в паропроводе. Расчет аналитического выражения осуществлялся в рамках модели, учитывающей образование (наработку) пара и его перенос по паропроводу с выходом на турбину. Сравнение расчетной и измеряемой величин позволяет получить аналитическое выражение (58) для мощности вброса в виде:

$$P_v = \left\{ \left[ D'_N(L, \tau_n) \cdot \lambda \right] / A_0 - (B_2 \times A_2 + B_3 \times A_3) \right\}, \quad (58)$$

где  $D'_N(L, \tau_n)$  – измеряемая эквивалентная мощность дозы;

$K$  – размерный коэффициент ( $K = 1,456 \cdot 10^3$  мЗв/час);  $E_N$  (МэВ),

$v_N$  – энергия и квантовый выход  $\gamma$ -излучения азота  $^{16}\text{N}_7$  соответственно;

$\mu$ ,  $\mu_a$  – линейный коэффициент и коэффициент передачи энергии  $\gamma$ -излучения ( $\text{м}^{-1}$ ) соответственно;

$$a = \mu \cdot (\bar{\rho}_n / \rho_{\text{возд}});$$

$$b = 1/L;$$

$$A_0 = [KE_N v_N (E_N) \mu_a \cdot (\bar{\rho}_n / \rho_{\text{возд}}) S_n];$$

$$A_1 = \left\{ \left( -\frac{\exp[-a(l_{vr}/2)]}{l_{vr}/2} + aEi[-a(l_{vr}/2)] \right) - \left( \frac{\exp[a(l_{vr}/2)]}{l_{vr}/2} + aEi[a(l_{vr}/2)] \right) \right\};$$

$$A_2 = \left\{ \left( -\frac{\exp[-(a+b)L]}{L} + (a+b) \times Ei[-(a+b)L] \right) - \left( \frac{\exp[(a+b)l_{vr}/2]}{l_{vr}/2} + (a+b)Ei[(a+b)l_{vr}/2] \right) \right\};$$

$$A_3 = \left\{ \left( -\frac{\exp[-aL]}{L} + aEi[-aL] \right) - \left( \frac{\exp[a(l_{vr}/2)]}{l_{vr}/2} + aEi[a(l_{vr}/2)] \right) \right\};$$

$$B_1 = \left\{ \frac{1 - \exp(-\lambda L / \bar{v}_n)}{\pi R_1^2 L} \right\};$$

$$B_2 = \left\{ \frac{\bar{v}_n \alpha_N V_n}{e} \frac{[1 - \exp(-\lambda L / \bar{v}_n)]}{\pi R_1^2 L (L_s - L_0)} \left[ \bar{\rho}_n(T) - \bar{\varphi}(T) \frac{2L_0}{R_1} \right] \right\};$$

$$B_3 = [\lambda Q_N(L_0) / \pi R_1^2 L] \cdot \exp(-\lambda \cdot L / \bar{v}_n);$$

$\alpha_N$  [Ки/кг] – параметр, определяющий содержание активности азота в выходящей массе пара за время  $\tau_n$ ;

$Ei(x)$  – интегральная показательная функция;

$L_0$  – длина водо-паропровода, заполняемая водой для образования пара;

$L_s (L_s = L_0 + L)$  – общая длина водо-паропровода;

$\lambda$  – постоянная распада азота  $^{16}\text{N}_7$ ;

$\bar{\varphi}(T)$  – среднее значение по температуре отношения скорости парообразования  $u_n(T)$  к скорости переноса пара по паропроводу  $v_n(T)$  ( $\varphi(T) = u_n(T)/v_n(T)$ ) в диапазоне температур  $170 \leq T \leq 290$  °C;

$\bar{\rho}_n(T)$  – среднее значение плотности пара в указанном диапазоне;

$l_{vr}$  – длина микротрещины в рассматриваемой области парогенератора;

$T_s$  – температура пара при выходе его на турбину;

$Q_N(L_0)$  – активность азота  $^{16}\text{N}_7$ , образующегося в пограничной области паропровода пар-вода.

$S_n = \pi R_1^2$  – площадь поперечного сечения паропровода.

Величину  $Q_N(L_0)$  находят из выражения (59) [3–6]:

$$\alpha_N = \frac{Q_N(L_0) \exp(-\lambda \tau_n)}{\left\{ V_n \rho_n(T_s) + \frac{\bar{v}_n V_n}{(L_s - L_0)} \left[ \varphi(T_s) \frac{2L_0}{R_1} - \rho_n(T_s) \right] \frac{[1 - \exp(-\lambda \tau_n)]}{\lambda} \right\}}, \quad (59)$$

в котором величину  $\alpha_N$  определяют экспериментально, измеряя за небольшой промежуток времени  $\tau \sim T_{1/2}$  азота  $^{16}\text{N}_7$  активность радионуклида и массу пара, вышедших в помещение за это время, после чего находят искомую величину  $Q_N(L_0)$ . Мощность



«вброса»  $P_b$ , согласно проведенным расчетам, составляет  $7,767 \cdot 10^4$  Ки/с.

Фактически расчет по формуле (58) повторяет расчет, приведенный в работах [3–6], с той лишь разницей, что в настоящей работе учитывается длина микротрещины, полученная по формуле (57), т.е. с учетом механизмов ее образования, тогда, как в указанных предыдущих работах, ее длина определялась максимальной разностью хода воды  $\Delta L_0$ , (табл. 3). С другой стороны, величина  $P_b$  определяется известным выражением (60) [16]:

$$P_b = Q_V \cdot G_N, \quad (60)$$

где  $Q_V$  – объемная активность радионуклида, в частности, радиоактивного азота в области вода-пар [Ки/м<sup>3</sup>] ( $Q_V(L_0) = Q_N(L_0)/\pi R_1^2 l_{vr}$ );

$G_N = 2\pi R_1 l_{vr} \cdot U_r$  – секундный расход «вброса» [м<sup>3</sup>/с] радиоактивного азота  $^{16}\text{N}_7$  в паровую фазу в пограничной области, представляющий собой произведение площади пограничной области паропровода  $S_{\text{пр}} = 2\pi R_1 l_{vr}$ , на скорость выхода радиоактивного азота из трещин  $U_r$ .

Следует заметить, что рассматриваемая площадь, через которую происходит вброс радионуклида азота  $^{16}\text{N}_7$  в парогенератор при протечке, строго говоря, не является реальной площадью. Это некая эффективная площадь, используемая в решаемой задаче на основании того, что реальную ширину трещин не представляется возможным определить. Из выражения (60) при найденном  $Q_V(L_0)$  находим указанный параметр ( $G_N = 2\pi R_1 l_{vr} \cdot U_r$ ) или скорость «вброса»  $U_r$  радиоактивного азота  $^{16}\text{N}_7$  и, таким образом, получаем расчетную оценку его протечки.

Таблица 3. Длина водного участка парогенератора  $L_0$ , м [3–6]

Table 3. Length of the steam generator water section  $L_0$ , м [3–6]

$P_{\text{гр}}, \text{МПа}$		6,24	6,4	6,56
$L_s, \text{м}$	10	0,7534	0,7636	0,7739
	20	0,8944	0,9063	0,9124
	35	0,983	0,9965	1,01
Максимальная разность «хода» воды в водо-паропроводе $\Delta L_0$ и длина микротрещины $l_{vr}$ , м				
$L_s, \text{м}$		$\Delta L_0$	$l_{vr}$	
	10	0,0205	0,031	
	20	0,024	0,042	
	35	0,027	0,056	

Таким образом, если принять, что в результате протечки, радиоактивный пар, выходящий из паропровода, создает мощность дозы сравнимую с радиационным фоном реактора 500 мкР/ч, т.е. 5 мкЗв/ч, то при найденных остальных параметрах ( $Q_N(L_0) = 0,176$  Ки) и скорости поступления пара на турбину  $v_0 = 50$  м/с, величина  $\alpha_N$  составит 0,031 Ки/кг и линейно будет возрастать или уменьшаться в соответствии с мощностью реактора, а скорость «вброса»  $U_r$  составит  $1,44 \cdot 10^3$  м/с. Грубую оценку  $U_r$  можно получить, исходя из размерности мощности «вброса». Действительно, если  $P_b$  известна, то время, за которое активность радиоактивного азота  $Q_N(L_0)$  образуется в паропроводе в пограничной области, найдем из отношения  $\tau = Q_N(L_0)/P_b$ , а скорость «вброса» определим, как  $U_r = l_{vr}/\tau$ , что для  $l_{vr}$  (см. табл. 3) составляет от  $1,37 \cdot 10^4$  до  $2,47 \cdot 10^4$  м/с, что свидетельствует о корректности ранее полученных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Иванов Е.А., Пырков И.В., Хамьянов Л.П. Модель накопления радионуклидов в котловой воде парогенераторов АЭС с ВВЭР-440 и -1000. *Атомная энергия*. 1994;77(1):58–63. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4940> (дата обращения: 16.09.2023).
- Иванов Е.А., Пырков И.В., Хамьянов Л.П. Методика диагностики протечки теплоносителя первого контура в котловую воду парогенераторов АЭС с ВВЭР-440 и -1000. *Атомная энергия*. 1994;77(1):51–58. Режим доступа: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4939> (дата обращения: 16.09.2023).
- Елохин А.П., Федорченко С.Н. Способ оценки протечки радиоактивного азота  $^{16}\text{N}_7$  в парогенераторах, используемых на ядерных реакторах типа КЛТ-40. *Патент РФ №2754755*, бюл. № 25 от 07.09.2021. Приоритет от 31.12.2020. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2754755C1/ru> (дата обращения: 16.09.2023).
- Елохин А.П., Федорченко С.Н. Расчетно-измерительный метод оценки протечки радиоактивного азота  $^{16}\text{N}_7$  в парогенераторах, используемых на ядерных реакторах типа КЛТ-40. *Глобальная ядерная безопасность*. 2021;4(41):16–30. <https://doi.org/10.26583/gns-2021-04-02>
- Elokhin A.P., Fedorchenko S.N. Determination of the leakage area of radioactive nitrogen  $^{16}\text{N}$  in steam generators in reactors of KLT-40 type. *Physics of Atomic Nuclei*. 2022;85(2):S42–S49. ISSN 1063-7788. <https://doi.org/10.1134/S106377882214006X>
- Elokhin A.P., Fedorchenko S.N. Calculation and instrumentation method of assessment of radioactive nitrogen  $^{16}\text{N}_7$  leaks in steam generators applied at KLT-40 type nuclear reactors. *AIP (American Institute of Physics) Conference Proceedings (published online 09 March 2023)*. 2023. Vol. 2700. P. 050017-050017-15. <https://doi.org/10.1063/5.0125107>
- Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. Москва: Наука, 1966. 724 с. Режим доступа: <https://studizba.com/files/show/djvu/3304-1-umf-tihonov.html> (дата обращения: 16.09.2023).
- Арсенин В.Я. Математическая физика. Основные уравнения и специальные функции. Москва: Наука, 1966. 367 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005948961> (дата обращения: 16.09.2023).
- Зайцев В.Ф., Полянин А.Д. Справочник по линейным обыкновенным дифференциальным уравнениям. Москва: Факториал, 1997. 303 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001763480> (дата обращения: 16.09.2023).
- Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. М. Абрамовиц, Д. Липман, А. Мак Ниш и др.; под ред. М. Абрамовица и И. Стиган; пер. с англ. под ред. В.А. Диткина и Л.Н. Кармазиной. Москва: Наука, 1979. 832 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007759009> (дата обращения: 16.09.2023).

11. Прудников, А.П., Брычков Ю.А. Маричев О.И. Интегралы и ряды. Специальные функции. Москва: Наука, 1983. 750 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001177065> (дата обращения: 16.09.2023).
12. Проскуряков К.Н., Беликов С.О., Адаменков А.К., Костин А.В. Прогнозирование возникновения акустических резонансов в системе генерации и транспортировки пара АЭС с ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2012;2-3(4):70–75. Режим доступа: [https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb\\_2-34.pdf](https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb_2-34.pdf) (дата обращения: 16.09.2023).
13. Исакович М.А. Общая акустика. Москва: Наука, 1973. 495 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007129077> (дата обращения: 16.09.2023).
14. Лепендин Л.Ф. Акустика. Москва: Высшая школа. 1978, 448 с. Режим доступа: <https://books.totalarch.com/node/5238> (дата обращения: 16.09.2023).
15. Елохин А.П., Ксенофонов А.И., Исса Алалем, Федорченко С.Н. Метод экспресс-оценки средней энергии спектра  $\gamma$ -излучения радионуклидов в условиях радиационных аварий в помещениях спецкорпуса АЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2018;2(27):7–15. Режим доступа: <https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/gyb.2018.2.pdf> (дата обращения: 16.09.2023).
16. Елохин А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды. Монография. Москва: НИЯУ МИФИ, 2014. 520 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007901898> (дата обращения: 16.09.2023).

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

## FUNDING:

The study had no external funding.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

## CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ:

**Александр Прокопьевич Елохин**, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», член-корреспондент РАН, Москва, Российская Федерация.  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7682-8504>  
e-mail: [elokhin@yandex.ru](mailto:elokhin@yandex.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR:

**Alexander P. Elokhin**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Associate Member of Russian Academy of Natural Sciences, National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russian Federation.  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7682-8504>  
e-mail: [elokhin@yandex.ru](mailto:elokhin@yandex.ru)

Поступила в редакцию 11.10.2023

После доработки 24.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Received 11.10.2023

Revision 24.11.2023

Accepted 30.11.2023