
ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 621.039.58

**РАСЧЕТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОТЕЧКИ
РАДИОАКТИВНОГО АЗОТА $^{16}\text{N}_7$ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ ТИПА КЛТ-40**

© 2021 А.П. Елохин*, С.Н. Федорченко*

*НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

**АО «СНИИП» г. Москва, Россия

В работе проводится анализ протечки радионуклида азота $^{16}\text{N}_7$, возникающего в 1-ом контуре реактора КЛТ-40, который используется на объектах морского транспорта различного назначения, через парогенератор ядерного реактора во второй контур, в который поступает вода под давлением P_v , с температурой $T_v \gg 100$ °С. Радиоактивный азот распространяется в паровой фазе и по спиральному паропроводу выходит на турбину под высоким давлением P_n , создавая неблагоприятные, с точки зрения радиационной безопасности, условия. Содержание указанного радионуклида в паре можно обнаружить и оценить методами γ -спектрометрии и дозиметрии, измеряя объёмную γ -активности пара и мощность дозы γ -излучения, при выходе пара на турбину. Анализ наблюдаемого эффекта протечки осуществлялся на основе использования несложной физико-математической модели, учитывающей перенос водной, паровой сред и перенос радиоактивного азота в паровой фазе, что позволило указать причину и определить область протечки на спиральном паропроводе, которая определялась из условия равенства давлений пара и воды в паропроводе. В работе указываются основные области конструкции парогенератора, позволяющие провести измерения радиационных характеристик, и необходимое приборное оборудование, учитывающее в своих показаниях физические особенности сред, в которых будет работать это оборудование.

Ключевые слова: энергетический реактор, радионуклид, парогенератор, давление температура, мощность дозы, радиационная безопасность.

Поступила в редакцию 21.10.2021

После доработки 10.12.2021

Принята к печати 13.12.2021

При эксплуатации реакторов серии КЛТ-40* и ряда других водо-водяных ядерных реакторов в соответствии с регламентом по радиационной безопасности ядерных корабельных установок, а именно, в помещении турбогенераторного машинного зала в условиях нормальной эксплуатации контролируемого объекта (турбины) и в условиях повышенной радиационной обстановки, наблюдался эффект выхода радионуклидов из первого контура во второй. Этот эффект, получивший в дальнейшем название «протечки», рассматривался в работах [1-3], в которых была предложена модель и методика диагностики протечки радионуклидов $^{131-135}\text{I}$, ^{24}Na , ^{42}K , $^{16}\text{N}_7$ и др. из теплоносителя первого контура в котловую воду парогенератора АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Физический смысл модели и методики состоит в оценке проникновения указанных радионуклидов в котловую воду парогенератора второго контура и степени их накопления. Модель предусматривает естественную линейную зависимость объёмной активности указанных радионуклидов от мощности реактора. Определение накопленной активности указанных радионуклидов котловой воды

*КЛТ-40 – водо-водяной ядерный реактор, разработанный в ОКБМ имени И. И. Африкантова. Изготавливался на Нижегородском машиностроительном заводе. Указанный тип реакторов широко используется на ледоколах и плавучих энергоблоках (ПЭБ).

парогенератора осуществлялось путем измерения активности фильтров, но радиоактивный газ, например, $^{16}\text{N}_7$ фильтрами не задерживается и выходит с паром, а изотопы йода остаются в воде (более чем на 99%) [1]. Недостаток этого метода состоит в том, что в его рамках удастся лишь констатировать наличие протечки по активности изотопов, осевших на фильтры, и активности радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ в помещении машзала при выходе пара на турбину. В лучшем случае можно оценить плотность потока γ -квантов, β -излучения и объемную активность радионуклида, используя показания сцинтилляционных детекторов. В указанном методе отсутствует возможность получения информации об области (на спиральном паропроводе) возникновения протечки, динамики ее развития, которая будет, очевидно, линейно зависеть от изменения мощности реактора, ее размерах и мощности «вброса» азота $^{16}\text{N}_7$ из первого контура во второй. Отсутствие этой информации не дает возможности однозначно ответить на вопрос, по какой причине происходит протечка; провести анализ металла водо-паропровода; его физико-механических свойств и их изменений при воздействии ИИ; изучить особенности способствующие возникновению микротрещин, через которые происходит протечка, с целью предотвращения подобных эффектов; а также прогнозирование величины ингаляционной дозы, которую может получить персонал, обслуживающий парогенератор и турбину, что приводит к нарушению требований нормативных документов [4, гл. 3, п. 3.1.6].

В связи с этим важное значение приобретает разработка метода оценки протечек, в частности, разработка корректной модели, позволяющей найти причины протечки, ее область в парогенераторе и, таким образом, ответить на поставленные вопросы.

В рассматриваемом методе оценки протечки радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ в парогенератор реактора КЛТ-40 из первого контура обнаруженный эффект состоял в том, что струя пара парогенератора, поступающего на турбину, содержала радионуклид радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ ($T_{1/2} = 7,11$ с, с энергией γ -излучения $E_{\gamma, \max} = 6,134$ МэВ и квантовым выходом $\nu_{\gamma, \max} = 69\%$; энергиями β -излучения $E_{\beta, 1} = 4,288$ МэВ, и выходом β -частиц $n_{\beta, 1} = 68\%$; $E_{\beta, 2} = 10,419$ МэВ, $n_{\beta, 2} = 26\%$) (см. рис.1), содержание которого в паре свидетельствовало о признаке нарушения герметичности водо-паропровода второго контура парогенератора и определялось путём использования сцинтилляционных детекторов с кристаллом NaJ(Tl), в силу высокой энергии γ - β -излучения, по эффекту образования пар, при выходе пара на турбину [5].

Рассмотрим принципиальную схему парогенератора, располагающегося вертикально на ядерной установке, на рисунке 1 (энергетические характеристики пара и воды приводятся из работ [1, 2]).

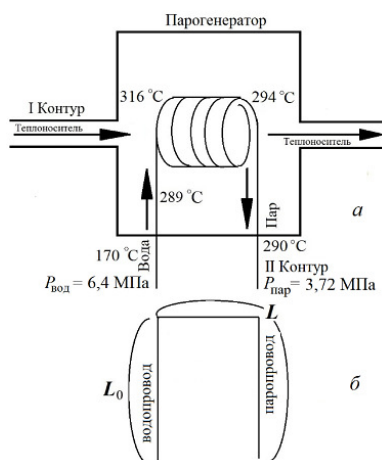


Рисунок 1 – Иллюстрация протечки радионуклида ^{16}N из первого контура в паропровод второго (а). К расчёту плотности пара $\rho_n(x)$ и объёмной активности $Q_N(x, t)$ ^{16}N в паропроводе парогенератора (б); l_{vr} – ширина области протечки [Illustration of the leakage of ^{16}N radionuclide from the first loop into the steam line of the second (a). Calculating the steam density $\rho_n(x)$ and the volumetric activity $Q_N(x, t)$ ^{16}N in the steam line of the steam generator (b); l_{vr} - width of the leak area]

Во второй контур парогенератора по водопроводу поступает вода под давлением P_v (левая область рис. 1 а), с температурой T_v , нагревается с образованием пара, выход которого через N спиральных паропроводов того же внутреннего диаметра осуществляется с температурой T_n под высоким давлением** P_n [6, 7]. В процессе прохождения воды по водопроводу в парогенераторе вода нагревается до температуры насыщения пара при соответствующем давлении, испаряется на внутренней поверхности трубок парогенератора, создавая эффективную пограничную область вода-пар и, наконец, в виде перегретого пара поступает на турбину. Таким образом, на вход турбины подается пар высокого давления, перегретый относительно температуры насыщения. Зависимость температуры кипения воды (парообразования) от её давления приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость температуры [Temperature dependence]

P		$t_k, ^\circ\text{C}$	P		$t_k, ^\circ\text{C}$
<u>кПа.</u>	<u>атм.</u>		<u>кПа.</u>	<u>атм.</u>	
0,981	0,01	6,698	196,1	2,0	119,62
1,961	0,02	17,20	245,2	2,5	126,79
3,923	0,05	28,64	294,2	3,0	132,88
9,807	0,1	45,45	392,3	4,0	142,92
19,61	0,2	59,67	490,3	5,0	151,11
29,42	0,3	68,68	588,4	6,0	158,08
39,23	0,4	75,42	686,5	7,0	164,17
49,03	0,5	80,86	784,5	8,0	169,61
58,84	0,6	85,45	882,6	9,0	174,53
68,65	0,7	89,45	980,7	10,0	179,04
78,45	0,8	92,99	1961	20,0	211,38
88,26	0,9	96,18	2452	25,0	222,90
98,07	1,0	99,09	4903	50,0	262,70
101,3	1,033	100,00	9807	100,0	309,53
147,1	1,5	110,79	-	-	-

Используя свойство воды как несжимаемой жидкости и учитывая, что процесс регулирования паро-водного баланса в водо-паропроводе автоматизирован, путём использования обратной связи, приходим к выводу, что избыток давления пара приведет к некоторому смещению воды относительно равновесного положения в пограничной области вода-пар, в которой температура будет изменяться в соответствии с температурой соответствующей среды.

Автоматическое регулирование процесса подпитки водой парогенератора, которое осуществляется с помощью поступления воды из уравнительной цистерны [6], приведёт к повышению давления воды в водопроводе и обратному смещению воды в первоначальное положение. Этот флуктуационный процесс около некоторого равновесного положения в указанной пограничной области пар-вода будет происходить с некоторой частотой.

Таким образом, в пограничной области на водо-паропроводе будет постоянно

** Такой тип парогенератора характерен для реакторов КЛТ-40 и других водо-водяных ядерных реакторов [6]

изменяться температурный режим. Последнее автоматически приведёт к аналогичному изменению частоты механических напряжений водо-паропровода в этой области, последующей усталости металла и к вероятному появлению микротрещин, через которые из первого контура во второй может проникать радионуклид $^{16}\text{N}_7$, создавая так называемую **протечку**.

Для оценки рассматриваемых величин в условиях стационарного процесса, необходимо знание плотности распределения воды $\rho_{\text{в}}(T)$, поступающей в водопровод парогенератора, как функции температуры при ее переносе вдоль оси x по водопроводу, плотности пара $\rho_{\text{п}}(T)$ как функции температуры или расстояния x при его переносе вдоль оси x по паропроводу (см. рис. 1 б) при спрямлении его спиральной части длиной L с внутренним радиусом $R_0=1,5-2,0$ см ($0 \leq r \leq R_0$). Следует отметить, что характер зависимости плотности воды и пара как функций температуры существенно различается: плотность воды с ростом температуры падает, а плотность пара растёт и, соответствующим образом изменяются давление воды и пара. Если принять, что рост температуры по водо-паропроводу пропорционален расстоянию x , то найдём, что при некотором x_L давление пара и воды может быть уравновешено. Тогда это значение $x_L = L_0$ и определит эффективную длину водопровода, в пограничной области которой будет возникать протечка. Если спираль паропровода представить горизонтальным участком (см. рис. 1 б), а изменение температуры в среде второго контура парогенератора аппроксимировать некоторой линейной функцией, зависящей от x :

$$T(x) = T(0) + b_t x / L_s \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

в которой $T(0) = 170 \text{ } ^\circ\text{C}$, $b_t = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$, а x удовлетворяет неравенству $0 \leq x \leq L_s$. Поскольку $\rho_{\text{в}}(T(x))$ является сложной функцией x , то $d\rho_{\text{в}}/dx = (d\rho_{\text{в}}/dT)(dT/dx) = (d\rho_{\text{в}}/dT)(b_t/L_s)$, а уравнение, описывающее процесс переноса воды в водопроводе после ряда несложных преобразований, можно представить в виде:

$$d\rho_{\text{в}} = \frac{L_s}{b_t} \sqrt{\frac{N\bar{\rho}_{\text{в}}}{2P_{\text{гр}}}} \left\{ \frac{G}{V_{\text{в}}} - u_{\text{п}}(T) \frac{S_{\text{в}}}{V_{\text{в}}} \right\} dT, \quad (2)$$

где, учитывая свойство воды как несжимаемой жидкости, ее скорость в каждой трубке водопровода полагать постоянной величиной $\bar{v}_{\text{в}}$, представляющей собой среднюю скоростью переноса воды по водопроводу, определяемую выражением:

$$\bar{v}_{\text{в}} = \sqrt{2P_{\text{гр}} / \left[(N/L_0) \cdot \int_0^{L_0} \rho_{\text{в}}(T(x)) dx \right]} = \sqrt{2P_{\text{гр}} / N\bar{\rho}_{\text{в}}}, \quad (3)$$

где G – ж генерация воды (нагнетание воды под давлением (см. рис. 1а) $G = \text{const.}$), [кг/с], определяемая в точке $T|_{x=0} = T(0)$ выражением: $G = S \sqrt{2\rho_{\text{в}}(T_0)P_{\text{гр}}}$; $u_{\text{п}}(T)$ – скорость испарения воды или скорость генерации пара, [кг/м²с]; $S_{\text{в}} = 2\pi R_0 L_0$ – площадь испарения воды. При этом температурная зависимость плотности воды в паропроводе $\rho_{\text{в}}(T)$ как функция x , будет определяться формулой (1), начальное условие, определяющее температуру воды при $x = 0$, будет соответствовать температуре её входа в парогенератор (см. рис. 1 а), а её плотность $\rho_{\text{в}}(T)$ в выделенном температурном диапазоне определится зависимостью, представленной на рисунке 2, при температуре T_0 . В формуле (3) $\rho_{\text{в}}(T)$ в диапазоне температур $170 \leq T \leq 290 \text{ } ^\circ\text{C}$ будет определяться зависимостью, приведенной на рисунке 2, которая аппроксимируется параболой $\rho_{\text{в}}(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$, [кг/м³] (a, b, c – коэффициенты соответствующей размерности): с

относительной погрешностью $\delta = 1,16 \%$, а изменение температуры с расстоянием x – формулой (1).

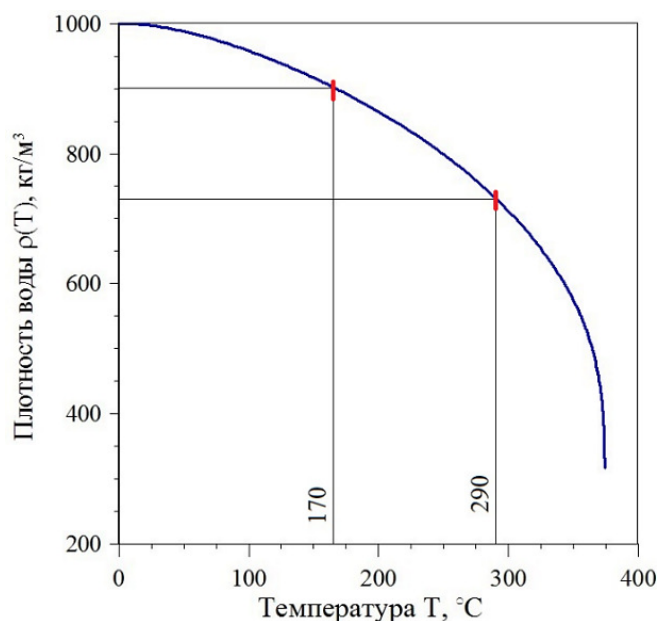


Рисунок 2 – Зависимость плотности воды $\rho(T)$ от температуры. Область кривой между метками аппроксимируется с относительной погрешностью $\delta = 1,16 \cdot 10^{-2} \%$ параболой вида:
 $\rho(T) = -0,002315 \cdot T^2 - 0,39345 \cdot T + 1033,79$ [кг/м³] [Dependence of water density $\rho(T)$ on temperature. The area of the curve between the marks is approximated with a relative error $\delta = 1,16 \cdot 10^{-2} \%$ by a parabola of the form:
 $\rho(T) = -0,002315 \cdot T^2 - 0,39345 \cdot T + 1033,79$ [кг/м³]]

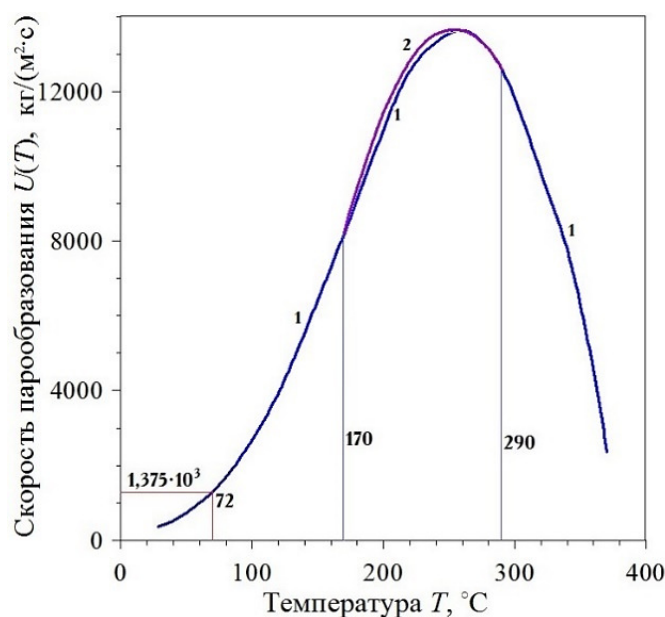


Рисунок 3 – Зависимость скорости испарения водяного пара дистиллированной воды от температуры (1)
 [Dependence of water vapor evaporation rate in distilled water on temperature (1)]

Результаты расчета в области $T \leq 100$ °C хорошо согласуются с данными эксперимента работы [8], (2) аппроксимация выделенной области температур $170 \leq T \leq 290$ °C параболой: $a_n T^2 + b_n T + c_n$ при $a_n = -0,7921$; $b_n = 401,0046$; $c_n = -37083,2407$ [The calculation results in the range of $T \leq 100$ °C are in good agreement with the experimental data of [8]. (2) approximation of the selected temperature range $170 \leq T \leq 290$ °C by a parabola: $a_n T^2 + b_n T + c_n$ при $a_n = -0,7921$; $b_n = 401,0046$; $c_n = -37083,2407$]

Поэтому среднее значение плотности, представленное в знаменателе подкоренного выражения в формуле (3), можно представить в виде:

$$\bar{\rho}_b(L_0) = \frac{1}{L_0} \int_0^{L_0} \rho_b(T(x)) dx = \frac{a}{3} \left[3T_0^2 + 3b_t T_0 \frac{L_0}{L_s} + b_t^2 \frac{L_0^2}{(L_s)^2} \right] + \frac{b}{2} \left[2T_0 + b_t \frac{L_0}{L_s} \right] + c, \quad (4)$$

где $a = -0,002315$; $b = -0,39345$; $c = 1033,79$.

Таблица 2 – Значение удельной теплоты парообразования воды как функция температуры [Specific heat of water vaporization as a function of temperature]

Температура °C	Удельная теплота парообразования $\Lambda(T)$, МДж/кг	Температура °C	Удельная теплота парообразования $\Lambda(T)$, МДж/кг
0	2,45	250	1,71
50	2,38	300	1,38
100	2,26	350	0,88
150	2,12	374	0
200	1,96	-	-

Зависимости скорости испарения как функции температуры $u_s(T)$ кг/м²·с, определяющей в уравнении (1) уменьшение массы воды или её плотности, в диапазоне температур $29 \leq T \leq 100$ °C представлена в работе [8]. В более широком диапазоне зависимость $u_n(T)$ может быть получена по формуле (5) Клапейрона-Клазиуса (рис. 3), согласно которой резкий спад $u_s(T)$ в области высоких температур обусловлен уменьшением удельной теплоты парообразования $\Lambda(T)$, также зависящей от температуры (табл. 2):

$$u_n(T) = u_n(T_0) \cdot \exp \left[-\frac{\Lambda(T)}{R} \left(\frac{T_0 - T}{T T_0} \right) \right], \quad (5)$$

где T_0 – начальная температура. Полная зависимость $\Lambda(T)$ в диапазоне температур $0 \leq T \leq 374$ °C приводится в таблице 2.

Решение уравнения (2) определяется выражением:

$$\rho_b(x, T) = \frac{L_n}{b_t} \sqrt{\frac{N \bar{\rho}_b}{2 P_{\text{гр}}}} \left\{ \frac{G}{V_b} T(x) - \frac{S_b}{V_b} \int_{T(0)}^{T(x)} u_n(T') dT' \right\} + C, \quad (6)$$

где постоянная C определяется через начальное условие, т.е. через значение плотности воды или через параболическую зависимость плотности воды от температуры $\rho_b(T)$:

$$\rho_b(T_0) - \frac{L_s}{b_t} \sqrt{\frac{N \bar{\rho}_b}{2 P_{\text{гр}}}} \frac{G}{V_b} T(0) = C,$$

а давление воды – выражением:

$$P_b[T(x)] = \rho_b[T(x)] \bar{v}_b^2 / 2. \quad (7)$$

Поскольку плотность пара является сложной функцией температуры, обусловленной температурной зависимостью скорости испарения воды $u_n(T)$, (5) и скоростью переноса пара в паропроводе $v_n(T)$, которые, в свою очередь, зависят от координаты x , то при формулировке уравнения переноса пара в трубопроводе поступим аналогичным образом, как и при решении уравнения (2).

В качестве оценки скорости переноса пара можно воспользоваться формулой Сен-Венана, определяющей истечение газа из резервуара в атмосферу как функции его температуры и давления [9, 10].

$$v_n(L) = \sqrt{[2k/(k-1)]RT_n(L)[1 - P_{ат}/P_n]^{k-1}}, \quad (8)$$

где k – постоянная адиабаты водяного пара; R – газовая постоянная (Дж/кг·К); $T_n(L)$ – температура пара на выходе из паропровода (°К); $P_{ат}$ – атмосферное давление; P_n – давление пара на выходе из паропровода, МПа. Тогда, учитывая, что отношение указанных функций $\varphi(T) = u_n(T)/v_n(T)$ также зависит от температуры (см. рис. 4), уравнение переноса пара в трубопроводе можно записать следующим образом:

$$\frac{d\rho_n}{dT} = \varphi(T) \frac{S_n \cdot L_s}{V_n \cdot b_t} - \frac{\rho_n \cdot L_s}{(L_s - L_0) \cdot b_t}, \quad (9)$$

где S_n – площадь парообразования ($S_n \approx 2\pi R_0 L_0$); $\tau_n = L/v_n$ – время «жизни» пара в паропроводе*; L – длина паропровода. Температурная зависимость функций $u_n(T)$, $v_n(T)$ и их отношения $\varphi(T) = u_n(T)/v_n(T)$ в диапазоне $170 \leq T \leq 290$ °С приведена на рисунках 3, 4 соответственно. Начальное условие определяется, исходя из следующих соображений.

Значение плотности пара в пограничной области $\rho_n(L_0)$, т.е. при $x = L_0$, можно найти, используя условия равенства давления воды и пара в этой области при заданной температуре, т.е. $P_w|_{x=L_0} = P_n|_{x=L_0}$. Поскольку давление воды при найденной зависимости плотности воды от температуры и координаты x , определенно выражением (7) то, рассматривая пар как идеальный газ и используя уравнение Клапейрона-Менделеева, найдём, что:

$$\rho_n[T(x)]|_{x=L_0} = \rho_w[T(x)]\bar{v}_w^2/2RT(x)|_{x=L_0}, \quad (10)$$

где $\bar{v}_w = \text{const.}$, определенная формулой (3), зависимость $T(x)$ – выражением (1), а $\rho_w[T(x)]$ – формулой (7). Пренебрегая потерями тепла в металлической трубе паропровода, будем полагать, что температурное распределение в паре паропровода будет определяться распределением вида (1), которое и будет определять температурную зависимость пара.

Функция $\varphi(T)$ также может быть аппроксимирована параболой $\varphi(T) = a_f T^2 + b_f T + c_f$ с относительной погрешностью температурной зависимости в интересующем нас диапазоне не хуже 1% (рис. 4), где $a_f = -0,5524 \cdot 10^{-3}$; $b_f = 0,2717515$; $c_f = -24,13445$.

* При понижении температуры время жизни пара будет определяться временем, которое необходимо для его конденсации, т.е. будет зависеть от температуры среды

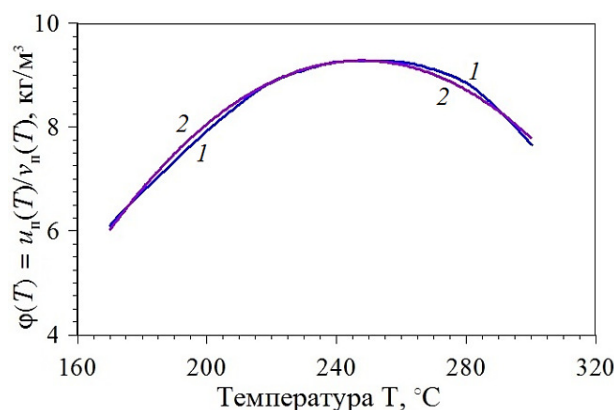


Рисунок 4 – Температурная зависимость отношения функций $\varphi(T) = u_n(T)/v_n(T)$ (1), кг/м³ и аппроксимация отношения параболой (2) [Temperature dependence of the ratio of functions $\varphi(T) = u_n(T)/v_n(T)$ (1), kg / m³ and approximation of the ratio by a parabola (2)]

Подобная процедура позволяет существенно упростить решение уравнения (9) и найти достаточно простое аналитическое выражение для анализа его решения.

$$\rho_n(T) = \frac{2L_0}{R_0(L_s - L_0)} \frac{L_s}{b_t} \left\{ a_f \left[\frac{T^2}{\alpha} - \frac{2T}{\alpha^2} + \frac{2}{\alpha^3} \right] + b_f \left[\frac{T}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \right] + \frac{c_f}{\alpha} - a_f \left[\frac{T_0^2}{\alpha} - \frac{2T_0}{\alpha^2} + \frac{2}{\alpha^3} \right] \exp[\alpha(T_0 - T)] - \right. \\ \left. - b_f \left[\frac{T_0}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \right] \exp[\alpha(T_0 - T)] - \frac{c_f}{\alpha} \exp[\alpha(T_0 - T)] \right\} + \rho_n(T_0) \exp[\alpha(T_0 - T)], \quad (11)$$

где $\alpha = L_s/[b_t(L_s - L_0)]$, а зависимость $T(x)$ определена формулой (2) и $T_0 \equiv T(x = L_0)$.

Таким образом, для $x = L_0$ в соответствии с формулой (2) и решением уравнения (9) получаем выражение для значения плотности пара $\rho_n(L_0)$ в пограничной области, что позволяет записать окончательное уравнение для граничного условия (10) и, в конечном итоге, найти искомое значение параметра L_0 , определяющего координату x возможной протечки в паропроводе парогенератора.

$$R\rho_n(L_0) \cdot \frac{(T_0 + 273) \cdot L_s + b_t \cdot L_0}{L_s} + \frac{L_s}{R_0 b_t} \cdot \sqrt{\frac{2P_{\text{гп}}}{N\bar{\rho}_B}} \cdot \int_{T_0}^{T(L_0)} u_n(T') dT' = \sqrt{\frac{P_{\text{гп}}}{2N\bar{\rho}_B}} \cdot \frac{G}{\pi R_0^2} + \frac{P_{\text{гп}}}{N\bar{\rho}_B} \cdot \rho_B(L_0). \quad (12)$$

Температурная зависимость функций $u_n(T), v_n(T)$ и их отношения $\varphi(T) = u_n(T)/v_n(T)$ в диапазоне $170 \leq T \leq 290$ °C приведены на рисунках 3 и 4 соответственно.

$$\int_{T_0}^{T(L_0)} u_n(T') dT' = b_t \cdot \frac{L_0}{L_s} \cdot \left\{ \frac{a_n}{3} \cdot [T(L_0)^2 + T(L_0) \cdot T_0 + T_0^2] + \frac{b_n}{2} \cdot [T(L_0) + T_0] + c_n \right\}.$$

Решение уравнения (12) находили графическим методом, строя графики зависимостей функций левой $U_l(L_0)$ и правой $U_r(L_0)$ его частей (рис. 5), определяемых соответственно выражениями:

$$U_l(L_0) = \rho_n(L_0) \cdot R \cdot \frac{(T_0 + 273) \cdot L_s + b_t \cdot L_0}{L_s} + \frac{L_s}{R_0 b_t} \cdot \sqrt{\frac{2P_{\text{гп}}}{N\bar{\rho}_B}} \cdot \int_{T_0}^{T(L_0)} u_n(T') dT'$$

$$U_r(L_0) = \sqrt{P_{\text{гр}} / 2N\bar{\rho}_B} \cdot \frac{G}{\pi R_0^2} + \frac{P_{\text{гр}}}{N\bar{\rho}_B} \cdot \rho_B(L_0).$$

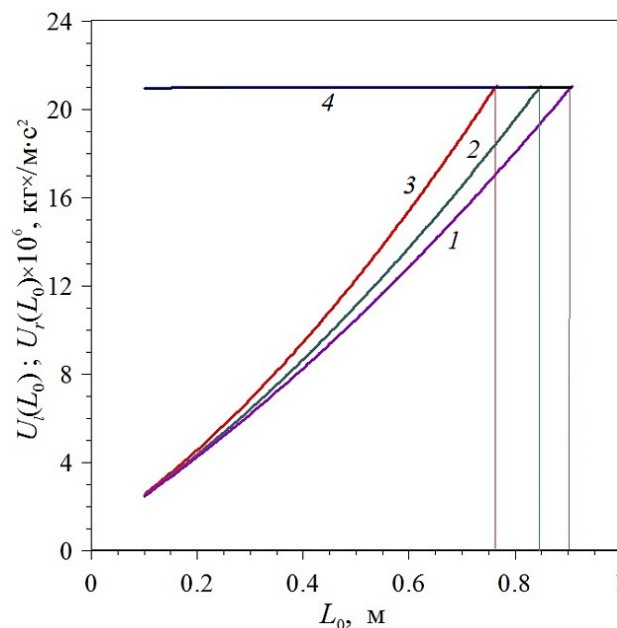


Рисунок 5 – Расчетная длина водного участка в парогенераторе второго контура реактора КЛТ-40. Функции $U_r(L_0)$ для $L_s = 20$ (1), 15 (2), 10 (3) м и $U_r(L_0) = \text{const}$ (4); $P_{\text{гр}} = 6,4$ Мпа [Estimated length of the water section in the second loop steam generator of the KLT-40 reactor. Functions $U_r(L_0)$ for $L_s = 20$ (1), 15 (2), 10 (3) м и $U_r(L_0) = \text{const}$ (4); $P_{\text{гр}} = 6.4$ MPa]

Значение активности радиоактивного азота ^{16}N , содержащегося в паровой фазе и выходящего на турбину $Q_N(L)$, может быть определено путём её измерения на выходе за определённый промежуток времени τ_n , за который определяют и выход пара m_n (воды). Тогда отношение $Q(L)/m_n(L) = \alpha_N$, определит размерный коэффициент α_N (Ки/кг), в области выхода пара на турбину, т.е. при $x = L$. При этом значение объёмной активности радиоактивного азота ^{16}N Q_{V0} (Ки/м³) при его генерации через микротрещины, возникающие в пограничной области вода-пар паропровода, будет определяться объёмной активностью в объёме парогенератора (см. рис. 1). Поскольку величина Q_{V0} тоже неизвестна, то общее произведение мощности «вброса», определяемое формулой:

$$P_B = Q_V \cdot G_N,$$

где G_N – секундный расход «вброса» [м³/с];

Q_V – объёмная активность радиоактивного азота [Ки/м³], будет в общем случае представлять собой искомую постоянную P_B .

В этом случае перенос радиоактивного азота ^{16}N в паропроводе может быть описан уравнением вида:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_N}{dt} = & P_B \left\{ \eta \left[x - (L_0 - l_{vr} / 2) \right] - \eta \left[x - (L_0 + l_{vr} / 2) \right] \right\} + \\ & + \frac{\bar{v}_n V_n \alpha_N}{(L_s - L_0)} \left[\rho_n(T) - \varphi(T) \frac{2L_0}{R_0} \right] - \lambda Q_N \end{aligned} \quad (13)$$

где L_0 – длина водопровода.

В уравнении (13) первый член в правой части описывает генерацию радиоактивного азота ^{16}N в пограничной области вода-пар шириной $l_{vr} \ll L_0$;

$\eta(x)$ – единичная функция; второй – убыль радиоактивного азота, содержащегося в паре, за счёт выноса последнего по паропроводу на турбину, третий – убыль радионуклида за счёт радиоактивного распада азота ^{16}N с постоянной распада λ , решение которого при $L_0 \leq x \leq L_s$ принимает вид:

$$Q_N(x, t) = \left\{ P_n \{ \eta[x - (L_0 - l_{vr}/2)] - \eta[x - (L_0 + l_{vr}/2)] \} + \frac{\bar{v}_n V_n \alpha_N}{(L_s - L_0)} \left[\rho_n(T) - \varphi(T) \frac{2L_0}{R_0} \right] \right\} \frac{[1 - \exp(-\lambda t)]}{\lambda} + Q_N(L_0) \exp(-\lambda t), \quad (14)$$

в котором температура зависит от x в соответствии с формулой (2), а постоянная $Q_N(L_0)$ подлежит определению. При найденной функции активности пара $Q_N(x, t)$ и плотности пара, определяемой формулой (11), целесообразно уточнить ранее введённый параметр α_N , который можно получить при выходе пара из паропровода в точке $x = L_s$ ($T_s = T_0 + b_t$ °C), исключая протечку, поскольку $P_n(x) \notin [(L_0 + l_{vr}/2) \leq x \leq L_s]$, в момент времени, соответствующий выходу пара из паропровода* $t = \tau_n = (L_s - L_0)/\bar{v}_n$ при $P_{гр} = 6,4$ МПа, $L_s = 20$ м, $L_0 = 0,9063$ м, $\bar{k} = 1,303$ и

$$\bar{v}_n = \frac{2}{3} \left[\frac{(T(L_s))^{3/2} - (T(L_0))^{3/2}}{T(L_s) - T(L_0)} \right] \cdot \sqrt{\frac{2\bar{k}}{\bar{k} - 1}} \cdot R \cdot \left[1 - \frac{P_{ат}}{P_n} \right]^{\frac{\bar{k}-1}{\bar{k}}} = 1,415 \cdot 10^3 \text{ м/с}. \quad (15)$$

$$\alpha_N = \frac{Q_N[(L_s - L_0), \tau_n]}{m_n(L_s - L_0)} = \frac{\bar{v}_n V_n \alpha_N}{(L_s - L_0)} \frac{\left[\rho_n(T_s) - \varphi(T_s) \frac{2L_0}{R_0} \right] [1 - \exp(-\lambda \tau_n)]}{V_n \cdot \rho_n(T_s)} + \frac{Q_N(L_0) \exp(1 - \lambda \tau_n)}{V_n \cdot \rho_n(T_s)}, \quad (16)$$

где v_n определена формулой (8), $\bar{v}_n$ – своим средним значением, $\rho_n(T_s)$ – формулой (11), L_0 – решением уравнения (12), а постоянная λ – периодом полураспада азота ^{16}N $\lambda = 0,693/T_{1/2}$. Из формулы (16) находим выражение для параметра α_N [Ки/кг], которое позволяет определить искомое значение активности азота $Q_N(L_0)$ в пограничной области вода-пар паропровода.

$$\alpha_N = Q_N(L_0) \exp(-\lambda \tau_n) / \left\{ V_n \rho_n(T_s) + \frac{\bar{v}_n V_n}{(L_s - L_0)} \left[\varphi(T_s) \frac{2L_0}{R_0} - \rho_n(T_s) \right] \frac{[1 - \exp(-\lambda \tau_n)]}{\lambda} \right\}, \quad (17)$$

Величину параметра α_N можно, например, оценить путем измерения мощности дозы, создаваемой γ -излучением азота ^{16}N , из ее математического выражения найти объемную активность и далее найти указанные параметры. С этой целью найдем мощность дозы γ -излучения азота ^{16}N при выходе пара в воздушную среду с образованием сферического облака диаметром $l = v_0 \cdot \tau_n$, где v_0 – скорость распространения пара в воздухе, которая по данным измерений составляет от 6 до 50 м/с; τ_n – время прохождения пара в паропроводе длиной $L = L_s - L_0$, оценка которого при использовании формулы (15) составляет величину $\tau_n \sim 13 \cdot 10^{-3}$ с. Далее

* Скорость пара при его выходе из паропровода при указанных на рисунке 1 значениях температуры и давления, согласно оценкам, составляет ~1512 м/с. При таких скоростях выхода пара на рабочие лопатки турбины развивалась бы очень высокая радиальная скорость турбины, что повлекло бы значительный рост центробежной силы, которая бы привела к колоссальному росту напряжений в диске турбины и особенно рабочих лопатках, что привело бы к превышению допустимых напряжений указанных конструкций и, как следствие, к их разрушению. Эти возможные эффекты и приводят к необходимости снижению давления и температуры пара, путем использования соответствующих технических решений. Энергетика. ТЭС и АЭС. Паровая турбина Всё о тепловой и атомной энергетике. <https://tesiaes.ru/?p=8414>

воспользуемся формулой мощности дозы от виртуального шарового источника с равномерно распределенными по объему изотропными точечными источниками с удельной активностью Ки/м³ без учета многократного рассеяния при условии $\mu r \ll 1$, μ – коэффициент линейного ослабления γ -излучения; $r = l/2$ – радиус сферы; $D'_{sf} = 2\pi K_\gamma Q_V(L) \cdot l$ [11], где D'_{sf} – измеряемая величина мощности дозы (мЗв/ч) в выделенном сферическом объеме радиоактивного пара $V_{sf} = \pi l^3/6$; $K_\gamma = 14,652$ [мЗв·м²/ч·Ки] – γ -постоянная азота ^{16}N [12], $Q_V(L)$ – виртуальная объемная активность радионуклида ^{16}N (Ки/м³) на выходе из паропровода, возникающая за указанный промежуток времени τ_n , определяемая отношением: $Q_V(L) = D'_{sf} / 2\pi K_\gamma \cdot l$. Используя решение (11), находим значение плотности пара ($\rho_n(L) = 509,87$ кг/м³), а его массу на выходе из паропровода в точке $x = L$ определим как $m_n(L) = V_n \cdot \rho_n(L) = \pi R_0^2 L \cdot \rho_n(L)$, ($m_n(L) = 10,905$ кг). При этом параметр α_N (Ки/кг), оценку которого получили на основе измерений мощности дозы, создаваемой γ -излучением азота ^{16}N , находящимся в облаке пара, принимает вид:

$$\alpha_N = Q_V(L) \cdot V_{sf} / m_n(L) = D'_{sf} \cdot l^2 / (12\pi K_\gamma \cdot R_0^2 \cdot L \cdot \rho_n(L)). \quad (18)$$

Если принять, что в результате протечки, радиоактивный пар, выходящий из паропровода, создает мощность дозы сравнимую с радиационным фоном реактора 500 мкР/ч, то при заданных остальных параметрах и $v_0 = 50$ м/с, величина α_N составит $1,102 \cdot 10^{-6}$ Ки/кг и линейно будет возрастать или уменьшаться в соответствии с мощностью реактора. Оценку массы пара, выходящего из паропровода, можно получить и из других соображений, определяя эту величину как среднюю массу $\bar{m}_n$ пара со средней плотностью $\bar{\rho}_n$ и объемом $\pi R_0^2 \bar{v}_n \cdot \tau_n$, выходящего из паропровода за время τ_n со средней скоростью $\bar{v}_n = 1415$ м/с. В этом случае масса пара составит 6,976 кг, а величина α_N увеличится до $1,723 \cdot 10^{-6}$ Ки/кг, т.е. эффективное значение параметра α_N будет находится в диапазоне $1,1 \cdot 10^{-6}$ – $1,7 \cdot 10^{-6}$ Ки/кг. Таким образом, по определенной формулой (18) величине α_N , из формулы (17) можно найти активность азота ^{16}N в пограничной области паропровода $Q_N(L_0)$, среднее значение которой при заданных параметрах составит $1,728 \cdot 10^{-5}$ Ки, а объемная активность $Q_V(L_0) = Q_N(L_0) / \pi R_0^2 l_{vr} = 0,55$ Ки/м³.

Сравнивая измеренную величину мощности дозы, создаваемой γ -излучением азота ^{16}N в некоторой точке $P(x_0, y_0, z_0)$ на выходе пара на турбину, и, её математическое выражение, определяемое формулой (19), найдем искомую величину протечки P_B :

$$D'_N(L, L/\bar{v}_n) = KE_{\gamma, N} v_N (E_{\gamma, N}) \mu_a \cdot (\bar{\rho}_{\text{пар}} / \rho_{\text{возд}}) S_n \int_{L_0 - l_{vr}/2}^{L_s} Q_V(x, t) \frac{\exp[-\mu \cdot (\bar{\rho}_{\text{пар}} / \rho_{\text{возд}}) (x - L_0)]}{(x - L_0)^2} dx, \quad (19)$$

где $Q_V(x, t) = Q_N(x, t) / \pi R_0^2 L$, а $Q_N(x, t)$ определена формулой (14), а множитель $(\bar{\rho}_{\text{пар}} / \rho_{\text{возд}})$; $\bar{\rho}_{\text{пар}} = \left(\int_0^L \rho_n(x) dx \right) / L$ при коэффициентах линейного ослабления μ и передачи энергии μ_a в формуле (19) учитывает особенности переноса γ -излучения в паре, в момент времени его прохождения по паропроводу $\tau_n = L / \bar{v}_n$.

$$P_B = \left\{ \left[D'_N(L, L/\bar{v}_n) \cdot (L_s - L_0) \right] / \left[KE_{\gamma, N} v_N (E_{\gamma, N}) \mu_a \cdot (\bar{\rho}_{\text{пар}} / \rho_{\text{возд}}) S_n \right] - (B_2 \times A_2 + B_3 \times A_3) \right\} / (B_1 \cdot A_1), \quad (20)$$

$$\text{где } A_1 = \left\{ -\frac{\exp[a(l_{vr}/2)]}{l_{vr}/2} + aEi[a(l_{vr}/2)] - \frac{\exp[-a l_{vr}/2]}{l_{vr}/2} + aE_1[-a l_{vr}/2] \right\};$$

$$A_2 = \left\{ \frac{\exp[(a+b)(l_{vr}/2)]}{-l_{vr}/2} + (a+b) \times Ei[(a+b)(l_{vr}/2)] - \frac{\exp[-(a+b)L]}{L} + (a+b)E_1[(a+b)L] \right\};$$

$$A_3 = \left\{ \frac{\exp[a(l_{vr}/2)]}{-l_{vr}/2} + aEi[a(l_{vr}/2)] - \frac{\exp[-aL]}{L} + aE_1[aL] \right\}; \quad B_1 = \left\{ \frac{1 - \exp(-\lambda L/\bar{v}_n)}{\lambda \cdot \pi R_0^2 L} \right\};$$

$$B_2 = \left\{ \bar{v}_n \alpha_N V_n \frac{[1 - \exp(-\lambda L/\bar{v}_n)]}{\lambda \cdot \pi R_0^2 L (L_s - L_0)} \left[\bar{p}_n(T) - \bar{\varphi}(T) \frac{2L_0}{R_0} \right] \right\}; \quad B_3 = [Q_N(L_0)/\pi R_0^2 L] \cdot \exp(-\lambda \cdot L/\bar{v}).$$

С другой стороны P_B может быть определено формулой [13]:

$$P_B = Q_V \cdot G_N, \quad (21)$$

где $G_N = 2\pi R_0 l_{vr} \cdot U_T$ – секундный расход «вброса» [м³/с];

Q_V – объёмная активность радионуклида, в частности, радиоактивного азота [Ки/м³]. Секундный расход G_N «вброса» радиоактивного азота ^{16}N в паровую фазу в пограничной области вода-пар представляет собой произведение площади пограничной области паропровода $S_{\text{пг}} = 2\pi R_0 l_{vr}$, где $l_{vr} = \Delta L_0$ – ширина пограничной области вода-пар* (water-vapour region) (табл. 3), на скорость выхода радиоактивного азота из трещин U_T , являющейся искомой величиной.

Таблица 3 – Длина водного участка парогенератора L_0 , м [Length of the steam generator water section L_0 , m]

$P_{\text{гр}}$, МПа		6,24	6,4	6,56
L_s , м	10	0,7534	0,7636	0,7739
	20	0,8944	0,9063	0,9124
Максимальная разность «хода» воды в водопаропроводе ΔL_0 , м				
L_s , м	10	0,0205		
	20	0,024		

Из выражения (21) при найденном $Q_V(L_0)$ нетрудно найти значение секундного расхода ($G_N = 2\pi R_0 l_{vr} \cdot U_T$) или скорости «вброса» U_T радиоактивного азота ^{16}N из первого контура в паропровод второго. При вычислении параметра P_B ширину протечки l_{vr} , как указывалось ранее, находят по разности «хода» воды ΔL_0 , используя показания расходомера или манометра (см. результаты расчетов в табл. 3), а начальную объёмную активность $Q_V(L_0)$ азота ^{16}N в области его генерации – по формулам (17), (18) при оценке параметра α_N . Расчетные оценки мощности «вброса» P_B , в рамках рассматриваемой модели дают величину $P_B \approx 2 \cdot 10^{-4}$ Ки/с. Тогда при объёмной активности области протечки $Q_V(L_0)$ равной 0,55 Ки/м³ секундный расход или «вброс» радиоактивного азота в пограничную область парогенератора составит $G_N = P_B/Q_V(L_0) = 3,64 \cdot 10^{-4}$ м³/с, а $U_T = 0,116$ м/с.

Предполагая, аналогично работе [1], линейную зависимость объёмной активности протечки азота ^{16}N от мощности реактора, отметим, что результаты измерений мощности дозы D'_N , создаваемой радиоактивным азотом ^{16}N при его выходе на

* Если водо-паропровод изготовлен в виде спирали радиусом $R_{\text{сп}}$ с шагом $h_{\text{сп}}$, то при длине пограничной области вода-пар равной ΔL_0 , площадь этой области $S_{\text{пг}}$ определится выражением: $S_{\text{пг}} = (\Delta L_0/h_{\text{сп}}) \cdot 4\pi^2 R_{\text{сп}}(R_{\text{ин}} + R_{\text{ек}})/2$, где $R_{\text{ин}}, R_{\text{ек}}$ – внутренний и внешний радиусы трубки водо-паропровода соответственно.

турбину, также будут обладать указанным свойством, а потому этим свойством будет обладать и найденный параметр P_v .

Поскольку измерение мощности дозы D'_N , создаваемой радиоактивным азотом ^{16}N при его выходе на турбину, является одной из ключевых процедур при оценке протечки, эти измерения необходимо проводить, используя детекторы γ -излучения с высоким температурным диапазоном их работы [14], что позволит уменьшить погрешность измерения указанной величины и, в конечном итоге, мощности «вброса» P_v .

Таким образом, проводя измерения мощности дозы при выходе пара на турбину и измеряя в этой точке объёмную активность ^{16}N и массу пара за время прохождения τ_n по паропроводу, определяя ширину пограничной области l_{gr} – по показанию расходомера, а также давление, температуру пара и воды, на основе предложенной модели и метода расчета, можно оценить протечку азота ^{16}N во второй контур из первого, определить величину выброса радиоактивного азота ^{16}N на турбину при любой мощности реактора, минимизировать протечку путём выбора соответствующих сплавов, используемых для паропроводов в парогенераторе, и, наконец, разработать соответствующие меры радиационной безопасности [4]. Результаты расчетов, представленные в работе, могут быть существенно уточнены путем использования реальных результатов измерений, которые, в свою очередь, требуют проведения экспериментальных исследований, затраты на которые полностью себя оправдают, определяя условия работ безопасных с точки зрения специалистов, контролирующих выполнение норм радиационной безопасности (НРБ) на предприятиях и соответствующем транспорте, где используются подобные реакторы. Решение этой сложной задачи авторы видят в объединении усилий специалистов Морфлота, занимающихся непосредственной эксплуатацией реакторов КЛТ-40, специалистов КБ им. И.И. Африкантова, имеющих громадный опыт по разработке такого типа реакторов, и авторов, предлагающих уникальную методику оценки протечки и области ее возникновения на спиральном паропроводе, представленную в виде патента и его дальнейшей реализации.

Результаты работы могут представлять интерес для подразделений, занимающихся проблемами радиационной безопасности на объектах использования атомной энергии, проектных организаций, занимающихся разработкой проектов парогенераторов для АЭС и плавсредств, использующих подобные атомные реакторы. В силу значимости и актуальности работы, обусловленной обновлением ледокольного флота России, авторы находят целесообразным проведения модельных экспериментов, позволяющих уточнить ряд дозиметрических характеристик, определяющих расчетные параметры модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов, Е.А.* Модель накопления радионуклидов в котловой воде парогенераторов АЭС с ВВЭР-440 и -1000 / Е.А. Иванов, И.В. Пырков, Л.П. Хамьянов. – Атомная энергия. – 1994. – Т. 77, вып. 1. – С. 58-63.
2. *Иванов, Е.А.* Методика диагностики протечки теплоносителя первого контура в котловую воду парогенераторов АЭС с ВВЭР-440 и -1000 / Е.А. Иванов, И.В. Пырков, Л.П. Хамьянов. – Атомная энергия. – 1994. – Т. 77, вып. 1. – С. 51-58.
3. Методика расчета протечки теплоносителя первого контура в воду парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000 : (типовая) : РД ЭО 0334-02: руководящий документ / Министерство Российской Федерации по атомной энергии, Концерн «Росэнергоатом». – Москва, 2001.
4. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. – Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/902170553>.
5. *Гусев, Н.Г.* Квантовое излучение радиоактивных нуклидов. Справочник / Н.Г. Гусев, П.П. Дмитриев. – Москва : Атомиздат, 1997. – 400 с.

6. Деев, В.И. Основы расчета судовых ЯЭУ / В.И. Деев, Н.В. Щукин, А.Л. Черезов. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2012. – 256 с.
7. Никитин, А. Плавающие атомные станции / А. Никитин, Л. Андреев. – Доклад объединения Bellona. – 2011. – 48 с.
8. Воробьев, И.Н. Экспериментальные исследования по определению значений скорости испарения и кипения жидкостей / И.Н. Воробьев, А.А. Хашченко. – URL : https://nauchforum.ru/archive/mnf_nature/2.pdf (дата обращения: 16.01.2019).
9. Елохин, А.П. Метод оценки протечки радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ в парогенераторах, используемых на ядерных реакторах типа КЛТ-40 / А.П. Елохин, С.Н. Федорченко. – Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3(32). – С. 7-23.
10. Сарданашвили, С.А. Расчётные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа) / С.А. Сарданашвили. – Москва : Нефть и газ, 2005. – 577 с.
11. Кимель, Р.Р. Защита от ионизирующих излучений. Справочник / Р.Р. Кимель, В.П. Машкович. – Москва : Атомиздат, 1966. – 311 с.
12. Способ оценки протечки радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ в парогенераторах, используемых на ядерных реакторах типа КЛТ-40 / А.П. Елохин, С.Н. Федорченко. // Патент №2754755 Бюл. №25 от 07.09.2021. Приоритет от 31.12.2020.
13. Елохин, А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды : монография / А.П. Елохин. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
14. Елохин, А.П. Метод экспресс-оценки средней энергии спектра γ -излучения радионуклидов в условиях радиационных аварий в помещениях спецкорпуса АЭС / А.П. Елохин, А.И. Ксенофонов, И. Алалем, С.Н. Федорченко. – глобальная ядерная безопасность. – 2018. – №2(27). – С. 7-15.

REFERENCES

- [1] Ivanov E.A., Pyrkov I.V., Khamyanov L.P. Model' nakopleniya radionuklidov v kotlovoj vode parogeneratorov AE'S s VVE'R-440 i -1000 [Model of Radionuclides Accumulation in Boiler Water of Steam Generators of NPP with WVER-440 and -1000]. Atomnaya e'nergiya [Atomic Energy]. 1994. Vol. 77, issue 1. P.58-63 (in Russian).
- [2] Ivanov E.A., Pyrkov I.V., Khamyanov L.P. Metodika diagnostiki protechki teplonositelya pervogo kontura v kotlovuyu vodu parogeneratorov AE'S s VVE'R-440 i -1000 [Diagnostic Technique of the Primary Coolant Leakage into the Boiler Water of Steam Generators of NPPs with WVER-440 and -1000]. Atomnaya e'nergiya [Atomic Energy]. 1994. Vol. 77, issue 1. P.51-58 (in Russian).
- [3] Metodika rascheta protechki teplonositelya pervogo kontura v vodu parogeneratorov AES s VVER-1000: (tipovaya): RD EO 0334-02: rukovodyashchiy document [Methodology for calculating the leakage of the primary coolant into the water of steam generators of NPPs with VVER-1000: (typical): RD EO 0334-02: guidance document]. Ministerstvo Rossiyskoy Federatsii po atomnoy energii, Kontsern «Rosenergoatom» [Ministry of the Russian Federation for Atomic Energy, Rosenergoatom Concern]. Moskva [Moscow]. 2001 (in Russian).
- [4] Normy' radiacionnoj bezopasnosti NRB-99/2009. Sanitarny'e pravila i normativy' SanPiN 2.6.1.2523-09. [Standards of Radiation Safety NRB-99/2009. Sanitary Rules and Regulations SanPiN 2.6.1.2523-09]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170553> (in Russian).
- [5] Gusev N.G., Dmitriev P.P. Kvantovoe izluchenie radioaktivny'x nuklidov. Spravochnik [Quantum Radiation of Radioactive Nuclides. Reference Book]. Moskva: Atomizdat [Moscow: Atomizdat]. 1997. 400 p. (in Russian).
- [6] Deev V.I., Shchukin N.V., Tcherzov A.L. Osnovy' rascheta sudovy'x YaE'U [Basics of Calculating Ship Nuclear Power Plants] Moskva: NIYaU MIFI [Moscow: NRNU MEPhI]. 2012. 256 p. (in Russian).
- [7] Nikitin A., Andreev L. Plavuchie atomny'e stancii [Floating nuclear power plants]. Doklad ob'edineniya Bellona [Bellona report]. 2011. 48 p. (in Russian).
- [8] Vorob'yov I.N., Khashchenko A.A. E'ksperimental'ny'e issledovaniya po opredeleniyu znachenij skorosti ispareniiya i kipeniya zhidkostej [Experimental Studies to Determine the Values of the Rate of Evaporation and Boiling of Liquids]. URL: https://nauchforum.ru/archive/mnf_nature/2.pdf (reference date 16.01.2019) (in Russian).
- [9] Eloxin A.P., Fedorchenko S.N. Metod ocenki protechki radioaktivnogo azota $^{16}\text{N}_7$ v parogeneratorax, ispol'zuemy'x na yaderny'x reaktorax tipa KLT-40 [Method of Assessing the Leakage of Radioactive Nitrogen $^{16}\text{N}_7$ in Steam Generators Used in Nuclear Reactors of the KLT-40 type]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2019. №3(32). P.7-23 (in Russian).

- [10] Sardanashvili S.A. Raschyotny'e metody' i algoritmy' (truboprovodny'j transport gaza) [Calculation methods and algorithms (pipeline gas transportation)]. Moskva: Neft' i gaz [Moscow: Oil and Gas]. 2005. 577 p. (in Russian).
- [11] Kimel' R.R. Zashhita ot ioniziruyushhix izluchenij. Spravochnik [Protection against Ionizing Radiation. Reference Book]. Moskva: Atomizdat [Moscow: Atomizdat]. 1966. 311 p. (in Russian).
- [12] Eloxin A.P., Fedorchenko S.N. Sposob ocenki protechki radioaktivnogo azota $^{16}\text{N}_7$ v parogeneratorax, ispol'zuemy'x na yaderny'x reaktorax tipa KLT-40 [Method of Assessing the Leakage of Radioactive Nitrogen $^{16}\text{N}_7$ in Steam Generators Used in Nuclear Reactors of the KLT-40 Type]. Patent №2754755 Byul. №25 ot 07.09.2021. Prioritet ot 31.12.2020. [Patent No. 2754755 Bul. No. 25 dated 09/07/2021. Priority 31.12.2020] (in Russian).
- [13] Eloxin A.P. Metody' i sredstva sistem radiacionnogo kontrolya okruzhayushhej sredy': monografiya [Methods and Tools of Environmental Radiation Monitoring Systems: monograph]. Moskva: NIYaU MIFI [Moscow: NRNU MEPhI]. 2014. 520 p. (in Russian).
- [14] Eloxin A.P., Ksenofontov A.I., Alalom I., Fedorchenko S.N. Metod e'kspress-ocenki srednej e'nergii spektra γ -izlucheniya radionuklidov v usloviyax radiacionny'x avariij v pomeshheniyax speczkorpusa AE'S [A method of Rapid Assessment of the Average Energy of the γ -Radiation Spectrum of Radionuclides in Conditions of Radiation Accidents in the Premises of the NPP Special Building]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2018. №2(27). P. 7-15 (in Russian).

Calculation and Measurement Method of Evaluating the Leakage of Radioactive Nitrogen $^{16}\text{N}_7$ in Steam Generators of Nuclear Reactors of KLT-40 Type

A.P. Elokhin^{*1}, S.N. Fedorchenko^{**2}

*National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute (NRNU MEPhI),
Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

¹ORCID iD: 0000-0001-6251-1736

WoS ResearcherID: S-9359-2019

e-mail: orumokenoll@yahoo.com

²ORCID iD: 0000-0002-7682-8504

WoS Researcher ID: G-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

Abstract – The paper analyzes the leakage of the $^{16}\text{N}_7$ nitrogen radionuclide which occurs in the 1st loop of the KLT-40 reactor which is used at marine transport facilities for various purposes through the steam generator of the nuclear reactor into the second loop into which water is supplied under pressure P_b with a temperature $T_b \gg 100$ °C. Radioactive nitrogen spreads in the vapor phase and goes through a spiral steam line to the turbine under high pressure P_{tr} , creating unfavorable conditions from the point of view of radiation safety. The content of the specified radionuclide in steam can be detected and evaluated by γ -spectrometry and dosimetry methods, by measuring the volumetric γ -activity of steam and the dose rate of γ -radiation when the steam enters the turbine. The analysis of the observed leakage effect was carried out on the basis of using a simple physical and mathematical model that takes into account the transfer of water, vapor media and the transfer of radioactive nitrogen in the vapor phase, which made it possible to indicate the cause and determine the area of leakage on the spiral steam pipeline, which was determined from the condition of vapor equality and water pressures in steam line. The paper specifies the main areas of the steam generator design allowing measurements of radiation characteristics and the necessary instrumental equipment taking into account the physical characteristics of the environments in which this equipment will operate in its readings.

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