



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01T 1/1612 (2021.02)

(21)(22) Заявка: 2020144331, 31.12.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
31.12.2020

Дата регистрации:
07.09.2021

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 31.12.2020

(45) Опубликовано: 07.09.2021 Бюл. № 25

Адрес для переписки:
124460, Москва, г. Зеленоград, а/я 200, ООО
"Институт инноваций и права", Кривоногова
Ксения Вячеславовна

(72) Автор(ы):
Елохин Александр Прокопьевич (RU),
Федорченко Станислав Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Елохин Александр Прокопьевич (RU),
Федорченко Станислав Николаевич (RU)

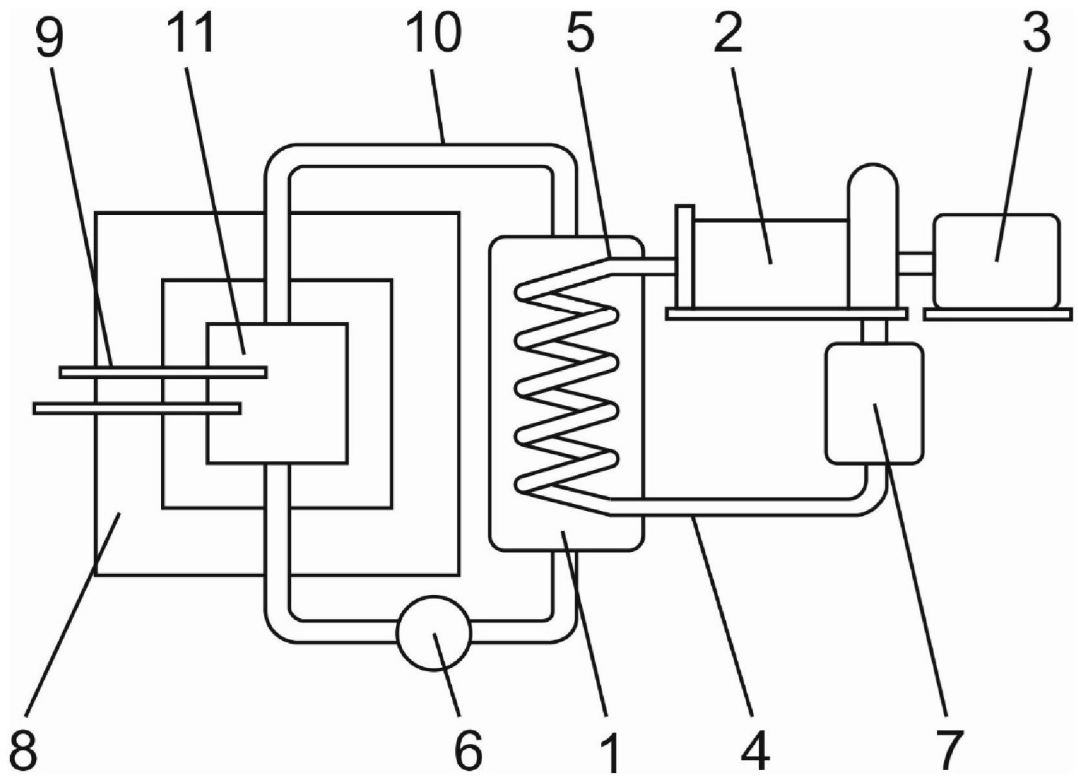
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: Елохин А.П., Федорченко С.Н.
"Метод оценки протечки радиоактивного
азота $^{16}\text{N}_7$ в парогенераторах, используемых
на ядерных реакторах типа КЛТ-40".
Проблемы ядерной, радиационной и
экологической безопасности. Глобальная
ядерная безопасность, 2019 N3(32), с. 7-23. RU
2191437 C1, 20.10.2002. SU 1175279 A1,
20.08.1999. US 4612158 A, 16.09.1986.

(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАСТИ ПРОТЕЧКИ РАДИОАКТИВНОГО АЗОТА В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ТИПА КЛТ-40

(57) Реферат:

Изобретение относится к области радиационного контроля и обеспечения радиационной безопасности объектов использования атомной энергии и может применяться для обнаружения области протечки радионуклидов и оценки ее величины при эксплуатации водо-водяных ядерных реакторов. Техническим результатом изобретения является обеспечение возможности обнаружения области протечки радиоактивного азота в парогенераторах ядерных реакторов КЛТ-40. Способ определения области протечки

радиоактивного азота в парогенераторах ядерных реакторов типа КЛТ-40 дополнительно содержит этапы, на которых наличие радионуклида в паре определяют по измеренному значению мощности дозы ионизирующего излучения и плотности пара в точке выхода пара на турбину через приведенный размерный коэффициент, характеризующий содержание радиоактивного азота в единице массы пара в точке выхода пара на турбину при его прохождении по паропроводу. 2 з.п. ф-лы, 9 ил., 3 табл.



Фиг.1

RU 2754755 C1

RU 2754755 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
G01T 1/16 (2006.01)
G01T 1/18 (2006.01)
G01T 1/20 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01T 1/1612 (2021.02)

(21)(22) Application: **2020144331, 31.12.2020**

(24) Effective date for property rights:
31.12.2020

Registration date:
07.09.2021

Priority:
(22) Date of filing: **31.12.2020**

(45) Date of publication: **07.09.2021** Bull. № 25

Mail address:
124460, Moskva, g. Zelenograd, a/ya 200, OOO
"Institut innovatsij i prava", Krivonogova Kseniya
Vyacheslavovna

(72) Inventor(s):
**Elokhin Aleksandr Prokopevich (RU),
Fedorchenko Stanislav Nikolaevich (RU)**

(73) Proprietor(s):
**Elokhin Aleksandr Prokopevich (RU),
Fedorchenko Stanislav Nikolaevich (RU)**

(54) **METHOD FOR DETERMINING THE AREA OF LEAKAGE OF RADIOACTIVE NITROGEN IN STEAM GENERATORS OF NUCLEAR REACTORS OF THE KLT-40 TYPE**

(57) Abstract:

FIELD: nuclear engineering.

SUBSTANCE: invention relates to the field of radiation monitoring and ensuring the radiation safety of nuclear facilities and can be used to detect the area of radionuclide leakage and assess its magnitude during the operation of light-water nuclear reactors. The method for determining the area of leakage of radioactive nitrogen in the steam generators of nuclear reactors of the KLT-40 type additionally contains stages at which the presence of radionuclide in the steam is determined by the measured value of the ionizing

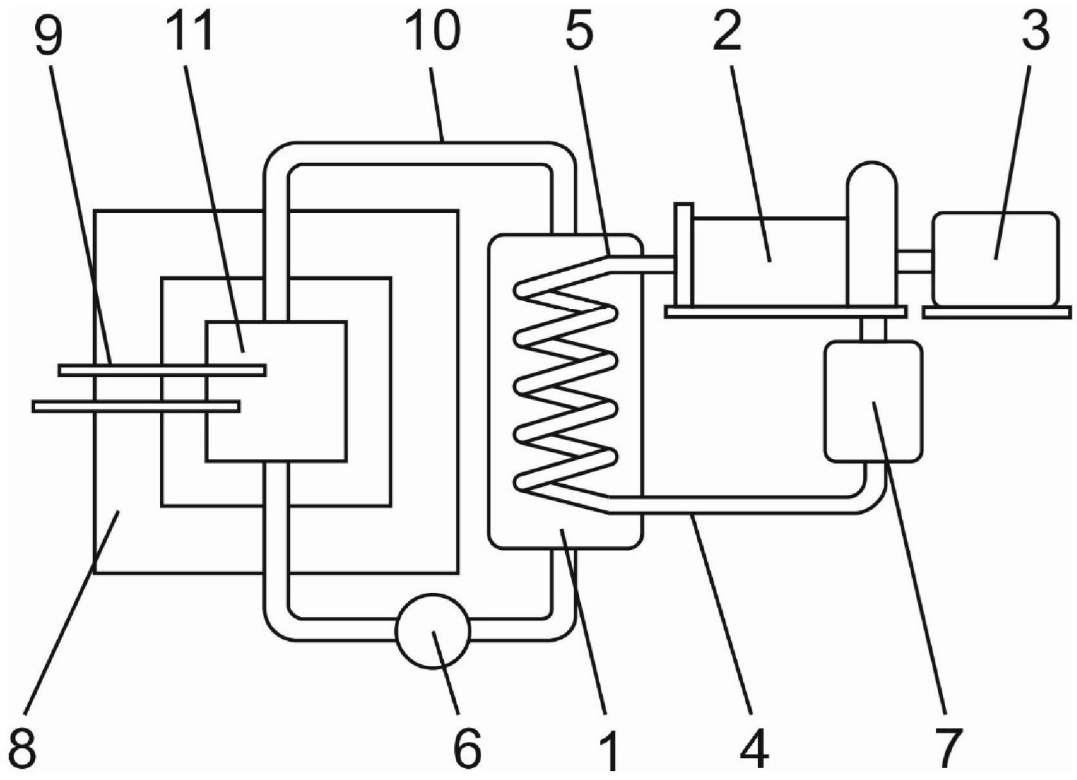
radiation dose rate and the vapor density at the steam outlet point to the turbine using the given dimensional coefficient characterizing the content of radioactive nitrogen in the mass unit of steam at the steam outlet point to the turbine during its passage through the steampipe.

EFFECT: providing the possibility of detecting the area of leakage of radioactive nitrogen in the steam generators of KLT-40 type nuclear reactors.

3 cl, 9 dwg, 3 tbl

RU 2 754 755 C1

RU 2 754 755 C1



Фиг.1

RU 2754755 C1

RU 2754755 C1

Изобретение относится к области радиационного контроля и обеспечения радиационной безопасности объектов использования атомной энергии и может применяться для обнаружения области протечки радионуклидов и оценки ее величины при эксплуатации водо-водяных ядерных реакторов [G01T 1/16, G01T 1/18, G01T 1/20].

5 Из уровня техники известен СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ОСТАНОВОМ ВОДО-ВОДЯНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА [RU 2706739 C2, опубл.: 20.11.2019], характеризующийся тем, что обнаружение утечки первого/второго контура осуществляют путем обнаружения одного или нескольких из следующих признаков:

- повышенная радиоактивность второго контура из-за загрязнения теплоносителем
- 10 первого контура;
- повышенный запас воды во втором контуре;
- пониженный запас воды в первом контуре.

Недостатком аналога является невозможность определения области протечки в контурах реактора, а также низкая точность определения наличия протечки.

15 Также известно УСТРОЙСТВО И СПОСОБ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧКИ [RU 2197718 C2, опубл.: 27.01.2003], в котором место утечки определяют, например, при известной скорости течения в коллекторном трубопроводе из промежутка времени, которое прошло между пиком давления в коллекторном трубопроводе и срабатыванием детектора для регистрации радиоактивности. Пик давления может, например, быть

20 вызван открыванием, по меньшей мере, одного обратного клапана.

Недостатком аналога является невозможность определения области протечки в коллекторном трубопроводе.

Наиболее близкой по технической сущности является МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В КОТЛОВОЙ ВОДЕ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС С ВВЭР-440

25 И ВВЭР-1000 [Иванов Е.А., Пырков И.В., Хамьянов Л.П. / Атом. энергия. - 1994. - Т. 77, N 1. - С. 58-63, 85. - ISSN 0004-7163] и МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ПРОТЕЧКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПЕРВОГО КОНТУРА В КОТЛОВУЮ ВОДУ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС С ВВЭР-440 И ВВЭР-1000 [Иванов Е.А., Пырков И.В., Хамьянов Л.П. / Атом. энергия. - 1994. - Т. 77, N 1. - С. 51-58, 85. - ISSN 0004-7163],

30 физический смысл которых состоит в оценке проникновения указанных радионуклидов из первого контура в котловую воду парогенератора второго и степени их накопления. Модель предусматривает естественную линейную зависимость объемной активности указанных радионуклидов от мощности реактора. Определение накопленной активности указанных радионуклидов котловой воды парогенератора осуществляется путем

35 измерения активности фильтров, но радиоактивный газ, например, радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ фильтрами не задерживается и выходит с паром, а изотопы йода остаются в воде (более чем на 99%).

Основная проблема прототипа состоит в том, что в его рамках удастся лишь

40 констатировать наличие протечки по активности изотопов, осевших на фильтры, и активности радиоактивного азота в помещении машинного зала при выходе пара на турбину. В лучшем случае можно оценить плотность потока гамма-квантов, бета-излучения и объемную активность радионуклида, используя показания сцинтилляционных детекторов. В указанном методе отсутствует возможность получения

45 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» радиоактивного 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 ионизирующего излучения и частой смене температурного режима в области протечки, изучить особенности способствующие возникновению микротрещин, через которые происходит протечка, с целью предотвращения подобных эффектов, а также прогнозировать величину внешней и ингаляционной дозы, которую может получить персонал, обслуживающий парогенератор и турбину, что приводит к нарушению условий радиационной безопасности в помещении машинного зала.

Исходя из этого в настоящее время запрещается эксплуатация парогенераторов при достижении суммарной удельной активности радионуклидов в продувочной воде ^{131}I 370 Бк/кг. Допустимая удельная активность ^{131}I в продувочной воде каждого парогенератора не более 740 Бк/кг, допустимая средняя удельная активность ^{131}I всех парогенераторов блока не должна превышать 185 Бк/кг. При этом протечка теплоносителя первого контура в котловую воду каждого парогенератора должна быть не более 5 кг/ч. 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.

Задачей изобретения является устранение недостатков прототипа.

Технический результат изобретения заключается в обеспечении возможности обнаружения области протечки радиоактивного азота в парогенераторах ядерных реакторов КЛТ-40.

Указанный технический результат достигается за счет того, что способ определения области протечки радиоактивного азота в парогенераторах ядерных реакторов типа КЛТ-40, характеризующийся тем, что область протечки в трубопроводе парогенератора определяют путем определения плотности распределения воды $\rho_{\text{в}}(T)$, поступающей в водопровод парогенератора как функции температуры при её 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 при спрямлении его спиральной части, при этом эффективную длину водопровода, в пограничной области которой возникла протечка, определяют как расстояние x_{L} , при котором давление воды и пара в водопаропровод парогенератора уравновешено, активности радионуклида $^{16}\text{N}_7$ в области «вброса» из первого контура во второй, а также площади «вброса», отличающийся тем, что наличие радионуклида в паре определяют по измеренному значению мощности дозы ионизирующего излучения и плотности пара в точке выхода пара на турбину через приведенный размерный коэффициент α_{N} , характеризующий содержание радиоактивного азота в единице массы пара в точке выхода пара на турбину при его прохождении по паропроводу длиной L, расстояние x_{L} определяют путем решения уравнения

$$R\rho_{\text{п}}(L_0) \cdot \frac{(T_0 + 273) \cdot L_s + b_t \cdot L_0}{L_s} + \frac{L_s}{R_0 b_t} \cdot \sqrt{\frac{2P_{\text{гр}}}{N\bar{\rho}_{\text{в}}}} \cdot \int_{T_0}^{T(L_0)} u_{\text{п}}(T') dT' = \sqrt{\frac{P_{\text{гр}}}{2N\bar{\rho}_{\text{в}}}} \cdot \frac{G}{\pi R_0^2} + \frac{P_{\text{гр}}}{N\bar{\rho}_{\text{в}}} \cdot \rho_{\text{в}}(L_0) \quad ,$$

где R – газовая постоянная, $\rho_{\text{п}}(L_0)$, $\rho_{\text{в}}(L_0)$ плотности пара и воды в точке $x_{\text{L}} \equiv L_0$ соответственно, $P_{\text{гр}}$ – давление воды, а площадь «вброса» в области протечки находят по разности расстояний x_{L} , возникающих в результате флуктуации давления воды в

области протечки, при которых также имеет место соответствующее равенство давлений воды и пара.

В частности, приведенный размерный коэффициент α_N определяют по формуле

5 $\alpha_N = Q_V(L) \cdot V_{sf} / m_n(L) = D'_{sf} \cdot l^2 / (12\pi K_\gamma \cdot R_0^2 \cdot L \cdot \rho_n(L))$, где $D'_{sf} = 2\pi K_\gamma Q_V(L)$ – измеряемая величина мощности дозы в выделенном сферическом объеме радиоактивного пара $V_{sf} = \pi l^3/6$ диаметром l , K_γ – γ -постоянная азота $^{16}\text{N}_7$, $Q_V(L)$ – виртуальная объемная активность радионуклида ^{16}N (Ки/м³) на выходе из паропровода длиной L , возникающая за промежуток времени τ_n .

10 В частности, приведенный размерный коэффициент α_N определяют, измеряя мощность дозы γ - β -излучения на выходе пара из паропровода, количество воды, образующейся при конденсации этого пара на выходе паропровода, температуру этого пара на выходе и определяя объем его выброса.

15 Краткое описание чертежей.

На фиг. 1 схематично изображена ядерно-энергетическая установка.

На фиг. 2 показана зависимость плотности воды от температуры.

На фиг. 3 показана зависимость скорости испарения водяного пара дистиллированной воды от температуры.

20 На фиг. 4 схематично изображен парогенератор с водо-паропроводом и протекающим теплоносителем.

На фиг. 5 показана зависимость удельной теплоты парообразования воды $\Lambda(T)$ (МДж/кг) от температуры T °С.

25 На фиг. 6 показана температурная зависимость скорости переноса пара в парогенераторе реактора КЛТ-40.

На фиг. 7 показана температурная зависимость отношения $\varphi(T) = u_n(T)/v_n(T)$: 1 – график отношения функций; 2 – аппроксимация отношения $\varphi(T)$ параболой в температурном диапазоне 170-290 °С.

30 На фиг. 8 показана зависимость скорости испарения водяного пара дистиллированной воды $u_n(T)$ от температуры: 1 – график функции $u_n(T)$; 2 – аппроксимация функции параболой в температурном диапазоне 170-290 °С.

На фиг. 9 показана расчетная длина водного участка L_0 в парогенераторе второго контура реактора КЛТ-40 при давлении $P_{гр}$: 1 – 6,56; 2 – 6,4; 3 – 6,24 МПа.

35 На фигурах обозначено: 1 – парогенератор, 2 – турбина, 3 – генератор, 4 – водопровод, 5 – паропровод, 6 – насос, 7 – конденсатор, 8 – защитная оболочка, 9 – стержни регулирования, 10 – трубопровод первого контура, 11 – реактор.

Осуществление изобретения.

40 Ядерная энергетическая установка – это устройство для получения тепловой, электрической или механической энергии в ходе управляемой ядерной реакции, осуществляемой в ядерном реакторе. Ядерная энергетическая установку, наряду с одним или несколькими ядерными (атомными) реакторами, включает парогенератор 1 (см. Фиг. 1), паровую турбину 2, приводимую ей в действие электрический генератор 3, а также трубопровод 4, паропровод 5, насос 6, конденсатор 7 и другое
45 вспомогательное оборудование. В современных стационарных ядерных энергетических установках в качестве рабочего тела применяется в основном водяной пар, поэтому все теплообменники первого контура двухконтурных схем являются парогенераторами 1. Трубопровод первого контура 10 проходит через реактор 11, в защитной зоне

которого, закрытой защитной оболочкой 8 смонтированы стержни регулирования 9 и сообщен с парогенератором 1 второго контура.

Общий принцип работы парогенератора 1 ядерной энергетической установки состоит в том, что во второй контур парогенератора 1 по трубопроводу 10 с помощью насоса 6 подают воду под давлением P_B , с температурой T_B . Тепло от воды, циркулирующей в первом контуре, передают воде второго контура, тем самым нагревают и подают ее в парогенератор 1, где с образованием пара, выход которого через N спиральных паропроводов 5 того же внутреннего диаметра осуществляется с температурой T_{II} под высоким давлением P_{II} . В процессе прохождения воды в парогенераторе 1 воду нагревают до температуры насыщения пара при соответствующем давлении, которая затем испаряется на внутренней поверхности трубок парогенератора 1, создавая эффективную пограничную область вода-пар, и, наконец, в виде перегретого пара по паропроводу 5 подают на турбину 2. Таким образом, на вход турбины 2 подают пар высокого давления, перегретый относительно температуры насыщения. Зависимость температуры кипения воды (парообразования) от её давления приведена в табл. 1.

P		$t_k, ^\circ\text{C}$	P		$t_k, ^\circ\text{C}$
кПа	атм.		кПа	атм.	
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	-	-	-

Автоматическое регулирование процесса подпитки водой парогенератора 1 приводит к повышению давления воды в водопроводе 4 и обратному смещению воды в первоначальное положение. В пограничной области на водопроводе 4 и паропроводе 5 температурный режим будет постоянно изменяться, что приводит к аналогичному изменению частоты механических напряжений водопровода 4 и паропровода 5 в этой области, последующей усталости металла и к вероятному появлению микротрещин, через которые из первого контура во второй 10 может проникать радионуклид $^{16}\text{N}_7$, создавая протечку. Поскольку плотность пара существенно меньше плотности воды, то радиоактивный азот будет распространяться в область паровой фазы, включая и выход пара на турбину 2.

Новым в изобретении является определение области протечки в водопроводе 4 и паропроводе 5, секундного расхода «вброса» радионуклида $^{16}\text{N}_7$ из первого контура во второй, скорости «вброса», площади области «вброса», а также определение активности радионуклида $^{16}\text{N}_7$ в области «вброса» из первого контура во второй в

заданной области паропровода 5, при этом наличие радионуклида в паре с учётом радиоактивного распада, в заданной точке (области) паропровода 5, определяют по измеренному значению плотности потока гамма, бета-излучения азота $^{16}\text{N}_7$ или мощности дозы ионизирующего излучения, создаваемой указанным радионуклидом в точке выхода пара на турбину 2, для оценки которых определяют плотность распределения воды $\rho_{\text{в}}(T)$, поступающей в водопровод 4 парогенератора 1, как функции температуры при её переносе вдоль оси x по водопроводу 5 (см. Фиг. 2), плотности пара $\rho_{\text{п}}(T)$ как функции температуры (см. Фиг. 3) или расстояния x при его переносе вдоль оси x по паропроводу 5 (см. Фиг. 4) при спрямлении его спиральной части длиной L с внутренним радиусом $R_0=1,5-2,0$ см ($0 \leq r \leq R_0$) при длине водопровода 4 $L_0 < L$ (вертикальная область в левой части) и общей длине водопровода 4 и паропровода 5 $L+L_0 = L_s$ составляющей для парогенератора 1 от 10 до 20 м. Принимая, что рост температуры по водопроводу 4 и паропроводу 5 пропорционален расстоянию x , то при некотором x_L давление пара и воды может быть уравновешено. По значению $x_L = L_0$ определяют эффективную длину водопровода 4, в пограничной области которой будет возникать протечка.

Рассмотрим метод оценки протечки радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ на примере парогенератора 1 реактора КЛТ-40. В теплоносителе (воде) первого контура находятся радионуклиды, включая и азот $^{16}\text{N}_7$, которые возникают в теплоносителе в результате физико-химического взаимодействия последнего с тепловыделяющими элементами (твелями) реактора 11. Этот теплоноситель служит источником тепла для спирального водопровода 4 и паропровода 5 парогенератора 1, в который подают воду под давлением $P_{\text{гр}} \approx 6,1 \div 6,4$ МПа и одновременно является источником радионуклидов, поступающих во второй контур. Вода, распространяющаяся по спиральному водопроводу 4 парогенератора 1, нагревается, что приводит к уменьшению её плотности, испарению и образованию насыщенного пара, давление которого увеличивается с ростом температуры, т.е. с ростом координаты x . Этот процесс происходит с определенной частотой. При этом в паропровode 5 в силу разной плотности сред возникает область раздела пар-вода, которая в зависимости от флуктуаций давления воды или пара смещается от равновесного положения в ту или другую сторону. Изменение температурного режима металла паропровода 5 приводит к росту механических напряжений, в результате которых в этой области могут возникнуть микротрещины, через которые и могут проникать радионуклиды из теплоносителя первого контура во второй. Далее перемещаясь по паропроводу 5 пар парогенератора 1 в виде струи, поступающей на турбину 2, содержит радиоактивный азот $^{16}\text{N}_7$ с периодом полураспада $T_{1/2} = 7,11$ с, энергией гамма-излучения $E_{\text{max}} = 6,134$ МэВ и квантовым выходом $\nu, \text{max} = 69\%$; энергиями бета-излучения $E_1 = 4,288$ МэВ, и выходом бета-частиц $n_1 = 68\%$; $E_2 = 10,419$ МэВ, $n_2 = 26\%$, содержание которого в паре свидетельствует о признаке нарушения герметичности водопровода 4 или паропровода 5 второго контура парогенератора 1. Содержание радиоактивного азота при выходе пара на турбину 2 определяют с помощью сцинтилляционных детекторов с кристаллом NaJ(Tl) .

Перенос воды в водопровode 4 осуществляется с заданной скоростью, определяемой начальным давлением и плотностью, уменьшением плотности воды с ростом

температуры и её испарением. В водопроводе 4 и паропроводе 5 небольшим радиусом масштаб турбулентности ограничен и не может быть больше внутреннего радиуса трубки, поэтому в уравнениях, описывающем перенос воды и пара турбулентность среды не учитывается. При этом, полагая, что поперечная скорость переноса воды на 5 стенки трубопровода 4 равна нулю, стационарное уравнение, учитывающее эти физические процессы для частицы воды массой $m = \rho(T)V_B$, занимающей объём $V_B = \pi R_0^2 L_0$, в цилиндрической геометрии будет выглядеть как:

$$10 \quad \frac{d\rho_B}{dT} = \frac{L_s}{b_t \bar{v}_B} \left\{ \frac{G}{V_B} - u_{\text{п}}(T) \frac{S_B}{V_B} \right\},$$

где \bar{v}_B – средняя скорость переноса воды по водопроводу 4; $G = \text{const}$ – генерация воды, нагнетаемой под давлением, [кг/с], определяемая в точке $T|x=0 = T_x$ выражением:

$$15 \quad G = S \sqrt{2\rho_B(T_0)P_{\text{гр}}},$$

$u_{\text{п}}(T)$ – скорость испарения воды или скорость генерации пара, [кг/м²с]; $S_B = 2\pi R_0 L_0$ – площадь испарения воды.

Площади испарения S_B воды и занимаемый ею объём V_B являются характеристиками 20 одного и того же объёма среды, то их отношение $S_B/V_B = 2/R_0$. Спираль паропровода 5 представляют в виде горизонтального участка (Фиг. 4), а изменение температуры в среде второго контура парогенератора 1 аппроксимируют линейной функцией $T(x) = T_0 + b_t x/L_s$ °С, в которой $T_0 = 170$ °С, $b_t = 120$ °С, а x удовлетворяет неравенству $0 \leq x \leq$ 25 L_s .

Скорость переноса воды массой m по водопроводу 4 определяют из условия равенства кинетической и потенциальной энергий давления воды на входе второго контура парогенератора 1:

$$30 \quad P_{\text{гр}} V_B / N = m \bar{v}_B^2 / 2,$$

где N – число водопроводов 4 в пакете.

В этом случае учитывают свойство воды как несжимаемой жидкости и считают ее скорость v_B в каждой трубке водопровода 4 постоянной величиной.

Окончательно среднюю скорость переноса воды в водопроводе 4 определяют через 35 среднюю плотность воды из выражения:

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

40 где зависимость плотности воды от температуры $\rho_B(T)$ аппроксимируется параболой

$\rho_B(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$, [кг/м³], где a , b , c – коэффициенты соответствующей размерности равные $a = -0,002315$; $b = -0,39345$; $c = 1033,79$, а изменение температуры с расстоянием x – $T(x) = T_0 + b_t x/L_s$.

45 По графику зависимости плотности воды ρ_B от температуры (см. Фиг. 2) при температуре T_0 плотность воды ρ_B , которая изменяется как функция расстояния x в соответствии с принятой линейной зависимостью температуры T от расстояния x , определяемой линейной функцией $T(x) = T_0 + b_t x/L_s$ °С в водопроводе 4 и паропроводе

5 составит 730 и 900 кг/м³ при температуре 170 и 290 °С соответственно.

Выражение для среднего значения плотности будет выглядеть как:

$$5 \quad \bar{\rho}_B(L_0) = \frac{1}{L_0} \int_0^{L_0} \rho_B(T(x)) dx = \frac{a}{3} \left[3T_0^2 + 3b_t T_0 \frac{L_0}{L_s} + b_t^2 \frac{L_0^2}{(L_s)^2} \right] + \frac{b}{2} \left[2T_0 + b_t \frac{L_0}{L_s} \right] + c.$$

Зависимости скорости испарения (скорости генерации пара) как функции температуры $u_{\Pi}(T)$ получают по формуле Клапейрона-Клазиуса, согласно которой резкий спад $u_{\Pi}(T)$ в области высоких температур обусловлен уменьшением удельной теплоты парообразования $\Lambda(T)$, также зависящей от температуры (см. Фиг. 5).

$$10 \quad u_{\Pi}(T) = u_{\Pi}(T_0) \cdot \exp \left[-\frac{\Lambda(T)}{R} \left(\frac{T_0 - T}{TT_0} \right) \right],$$

15 где T_0 – начальная температура.

Принимают для оценки $u_{\Pi}(T)$ в диапазоне температур 170-290°С $T_0 = 72$ °С и $u_{\Pi}(T_0) = 1,375 \cdot 10^3$ кг·м⁻²·с⁻¹ (см. Фиг. 6).

Из фиг.2 и 3 следует, что в температурном диапазоне от 100 до 220 °С скорость испарения воды с ростом температуры резко увеличивается, а ее плотность, напротив, быстро уменьшается. Тогда, полагая постоянной скорость переноса воды по водопроводу 4, поскольку её перенос происходит без трения, которому способствует процесс парообразования на внутренней поверхности трубок парогенератора 1, давление воды с ростом x , т.е. с ростом температуры, будет также уменьшаться пропорционально плотности воды, а пара, напротив, возрастать.

25 Плотность воды определяют по формуле:

$$30 \quad \rho_B(x, T) = \frac{L_s}{b_t} \sqrt{\frac{N\bar{\rho}_B}{2P_{\text{гр}}}} \left\{ \frac{G}{V_B} T(x) - \frac{S_B}{V_B} \int_{T_0}^{T(x)} u_{\Pi}(T') dT' \right\} + C,$$

где постоянная C определяется через значение плотности воды из фиг. 2 при $T = T_0$, $x = 0$ или через параболическую зависимость плотности воды от температуры $\rho_B(T)$:

$$35 \quad \rho_B(T_0) - \frac{L_s}{b_t} \sqrt{\frac{N\bar{\rho}_B}{2P_{\text{гр}}}} \frac{G}{V_B} T_0 = C.$$

При описании процесса скорости переноса пара также не учитывают скорость турбулентной диффузии пара, поскольку она значительно меньше его скорости, обусловленной адвективной составляющей и, обозначив массу пара через $m_{\Pi} = \rho_{\Pi} \cdot V_{\Pi}$,

40 где V_{Π} – внутренний объём паропровода 5 ($V_{\Pi} = \pi R_0^2 \cdot L$), уравнение переноса, для плотности пара по паропроводу при его поперечной скорости равной нулю для стационарного процесса, определяют выражением:

$$45 \quad v_{\Pi}(T) \frac{d\rho_{\Pi}}{dx} = u_{\Pi}(T) \frac{S_{\Pi}}{V_{\Pi}} - \frac{\rho_{\Pi}}{L} v_{\Pi}(T),$$

где v_{Π} – продольная скорость переноса пара по паропроводу 5; S_{Π} – площадь парообразования ($S_{\Pi} \approx 2\pi R_0 L_0$); $\tau_{\Pi} = L/v_{\Pi}$ – время «жизни» пара в паропроводе 5.

В последнем выражении скорости как переноса пара $v_{\text{п}}$, так и его генерации (при испарении воды) $u_{\text{п}}$ зависят от его температуры и давления. В качестве оценки скорости переноса пара используют формулу Сен-Венана, определяющей истечение газа из резервуара в атмосферу как функции его температуры и давления:

$$v_{\text{п}}(L) = \sqrt{[2k/(k-1)]RT_{\text{п}}(L)[1 - P_{\text{ат}}/P_{\text{п}}]^{k-1}},$$

где k – постоянная адиабаты водяного пара; R – газовая постоянная (Дж/кг °К); $T_{\text{п}}(L)$ – температура пара на выходе из паропровода (°К); $P_{\text{ат}}$ – атмосферное давление; $P_{\text{п}}$ – давление пара на выходе из паропровода 5, МПа.

Общий график зависимости $v(T)$ приведен на Фиг. 6.

Значение плотности пара в пограничной области $\rho_{\text{п}}(L_0)$, т.е. при $x = L_0$, находят используя условия равенства давления воды и пара в этой области при заданной температуре, т.е.:

$$P_{\text{в}}|_{x=L_0} = P_{\text{п}}|_{x=L_0}$$

Рассматривая пар как идеальный газ и используя уравнение Клапейрона-Менделеева, граничное условие в области $x = L_0$ получают в виде:

$$\rho_{\text{п}}[T(x)]|_{x=L_0} = \rho_{\text{в}}[T(x)]\bar{v}_{\text{в}}^2/2RT(x)|_{x=L_0}$$

Поскольку плотность пара является сложной функцией температуры, обусловленной температурной зависимостью скорости испарения воды $u_{\text{п}}(T)$ и скоростью переноса пара в паропроводе 5 $v_{\text{п}}(T)$, которые, в свою очередь, зависят от координаты x , то $d\rho_{\text{п}}/dx = (d\rho_{\text{п}}/dT)(dT/dx) = (d\rho_{\text{п}}/dT)(b_t/L_s)$, и учитывая, что отношение указанных функций $\varphi(T) = u_{\text{п}}(T)/v_{\text{п}}(T)$ также зависит от температуры, уравнение для плотности пара при условии стационарного процесса переписывают в виде:

$$\frac{d\rho_{\text{п}}}{dT} = \varphi(T) \frac{S_{\text{п}} \cdot L_s}{V_{\text{п}} \cdot b_t} - \frac{\rho_{\text{п}} \cdot L_s}{(L_s - L_0) \cdot b_t},$$

где функция $\varphi(T)$ также аппроксимируется параболой:

$$\varphi(T) = a_f T^2 + b_f T + c_f,$$

с относительной погрешностью температурной зависимости в интересующем диапазоне не хуже 1% (см. Фиг. 7), где $a_f = -0,5524 \cdot 10^{-3}$; $b_f = 0,2717515$; $c_f = -24,13 445$.

При этих условиях решение уравнения для пара, определяющее его плотность, принимает вид:

$$\rho_{\text{п}}(T) = \frac{2L_0}{R_0(L_s - L_0)} \frac{L_s}{b_t} \left\{ \begin{aligned} & \left[a_f \left[\frac{T^2}{\alpha} - \frac{2T}{\alpha^2} + \frac{2}{\alpha^3} \right] + b_f \left[\frac{T}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \right] + \frac{c_f}{\alpha} - a_f \left[\frac{T_0^2}{\alpha} - \frac{2T_0}{\alpha^2} + \frac{2}{\alpha^3} \right] \exp[\alpha(T_0 - T)] - \right. \\ & \left. - b_f \left[\frac{T_0}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \right] \exp[\alpha(T_0 - T)] - \frac{c_f}{\alpha} \exp[\alpha(T_0 - T)] \right] + \\ & + \rho_{\text{п}}(T_0) \exp[\alpha(T_0 - T)] \end{aligned} \right\}$$

где $\alpha = L_s/[b_t \cdot (L_s - L_0)]$.

Для оценки начальной плотности пара $\rho_{\text{п}}(T_0)$ T_0 (°К) используют уравнение

Клапейрона – Менделеева и данными рис. 4, что дает $\rho_{\text{п}}(T_0) = P(T_0+273)/RT_0 = 4,135$ кг/м³. Таким образом, для $x = L_0$ в соответствии с $T(x) = T_0 + b_t x/L_s$ и решением уравнения для пара, получают выражение для значения плотности пара $\rho_{\text{п}}(L_0)$ в пограничной области, что позволяет записать окончательное уравнение для граничного условия в области $x_L \equiv L_0$ и, в конечном итоге, значение параметра L_0 , определяющего координату x возможной протечки в паропроводе парогенератора выражают как:

$$R\rho_{\text{п}}(L_0) \cdot \frac{(T_0 + 273) \cdot L_s + b_t \cdot L_0}{L_s} + \frac{L_s}{R_0 b_t} \cdot \sqrt{\frac{2P_{\text{гр}}}{N\bar{\rho}_B}} \cdot \int_{T_0}^{T(L_0)} u_{\text{п}}(T') dT' = \sqrt{\frac{P_{\text{гр}}}{2N\bar{\rho}_B}} \cdot \frac{G}{\pi R_0^2} + \frac{P_{\text{гр}}}{N\bar{\rho}_B} \cdot \rho_B(L_0).$$

Температурная зависимость функций $u_{\text{п}}(T)$, $v_{\text{п}}(T)$ и их отношения $\varphi(T) = u_{\text{п}}(T)/v_{\text{п}}(T)$ в диапазоне $170 \leq T \leq 290$ °С приведены на Фиг. 8, 6, 7 соответственно.

Из Фиг. 8 следует, что рост температуры определяет две области, в которых скорости генерации пара существенно различаются. В диапазоне температур $30 \leq T \leq 240$ °С скорость генерации с ростом температуры растет, достигая своего максимума, а затем уменьшается, что обусловлено резким спадом удельной теплоты парообразования воды $\Lambda(T)$ в области температур $230 \leq T \leq 380$ °С (см. Фиг. 5). Поэтому наиболее значимой областью генерации пара из выделенной области температур является диапазон $440-530$ °К ($167-257$ °С).

Далее вычисляют интеграл от скорости парообразования $u_{\text{п}}(T)$, значение которого находят, используя аппроксимацию параболой указанную кривую (см. Фиг. 8) в интересующем диапазоне температур $170 \leq T \leq 290$ °С. Чтобы упростить вычисления находят коэффициенты $a_{\text{п}} = -0,7921$; $b_{\text{п}} = 401,0046$; $c_{\text{п}} = -37083,2407$, что позволяет провести расчет с точностью не хуже 1% и получить расчетную функцию:

$$\int_{T_0}^{T(L_0)} u_{\text{п}}(T') dT' = b_t \cdot \frac{L_0}{L_s} \cdot \left\{ \frac{a_{\text{п}}}{3} \cdot [T(L_0)^2 + T(L_0) \cdot T_0 + T_0^2] + \frac{b_{\text{п}}}{2} \cdot [T(L_0) + T_0] + c_{\text{п}} \right\}.$$

Решение уравнения для граничного условия в области $x = L_0$ находят графическим методом, строя графики зависимостей функций левой: $U_l(L_0)$ и правой $U_r(L_0)$ его частей, определяемых соответственно выражениями:

$$U_l(L_0) = \rho_{\text{п}}(L_0) \cdot R \cdot \frac{(T_0 + 273) \cdot L_s + b_t \cdot L_0}{L_s} + \frac{L_s}{R_0 b_t} \cdot \sqrt{\frac{2P_{\text{гр}}}{N\bar{\rho}_B}} \cdot \int_{T_0}^{T(L_0)} u_{\text{п}}(T') dT',$$

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

Функция $U_r(L_0)$ представляет собой, практически, постоянную, зависящую от параметра давления воды $P_{\text{гр}}$. Поэтому абсцисса точки пересечения графиков и определяет величину параметра L_0 – длину водного участка парогенератора 1.

Результаты расчетов для парогенераторов 1, различающихся общей длиной L_s , приведены на Фиг. 9, на которой кривые 1, 2, 3 определяют зависимость функции $U_l(L_0)$ при $P_{\text{гр}} = 6,4$ МПа и общей длине парогенератора 1 L_s равной 20 м (кривая 1), 15 м (кривая 2) и 10 м (кривая 3), а функция $U_r(L_0)$ (кривая 4) представляет собой величину, слабо изменяющуюся с ростом L_0 от $2,098 \cdot 10^7$ ($L_0 = 0,1$) до $2,101 \cdot 10^7$ ($L_0 = 0,9063$).

С ростом давления воды $P_{гр}$ во втором контуре значение функции $U_1(L_0)$ также увеличивается и, напротив, уменьшается с падением давления (см. Табл. 2), значение постоянной $U_r(L_0)$ также изменяется соответствующим образом, но характер решения остается прежним. Изменение давления определяют его флуктуацией и составляет $\pm 2,5\%$ от $6,4 \times 10^6$ Па.

Таблица 2			
Длина водного участка парогенератора L_0 , м			
$P_{гр}$, МПа	6,24	6,4	6,56
L_s , м	10	0,7534	0,7636
	20	0,8944	0,9063
Максимальная разность «хода» воды ΔL_0 , м			
L_s , м	10	0,0205	
	20	0,024	

Поскольку период полураспада ^{16}N весьма мал, то при формулировке уравнения переноса радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ по паропроводу 5 рассматривают его во времени, учитывая локальную генерацию в пограничной области вода-пар, уменьшение в результате радиоактивного распада и, кроме того, наличие радиоактивного азота в объёме пара, распространившегося в последнем в предыдущие моменты времени. При этом величину плотности пара определяют решением уравнения для плотности пара. Значение активности радиоактивного азота ^{16}N , содержащегося в паровой фазе, и выходящего на турбину 2 $Q_N(L)$, определяют путём её измерения на выходе за определённый промежуток времени $\tau_{п}$, за который определяют и выход пара $m_{п}$ (воды). Тогда отношение $Q(L)/m_{п}(L) = \alpha_N$, определит размерный коэффициент α_N (Ки/кг), в области выхода пара на турбину 2, т.е. при $x = L$.

Генерация радиоактивного азота может быть представлена мощностью «вброса» $^{16}\text{N}_7$ в паровую фазу, которую определяют следующим выражением:

$$P_B = Q_V G_N,$$

где G_N – секундный расход «вброса» [$\text{м}^3/\text{с}$]; Q_V – объёмная активность радиоактивного азота [$\text{Ки}/\text{м}^3$].

Если объёмную активность $^{16}\text{N}_7$ измерить на выходе из паропровода 5, то в его начальной точке ($x = L_0$), т.е. в области его генерации, значение начальной объёмной активности Q_A может быть найдено с поправкой на радиоактивный распад $^{16}\text{N}_7$.

Секундный расход G_N «вброса» радиоактивного азота ^{16}N в паровую фазу в пограничной области вода-пар представляет собой произведение площади пограничной области паропровода 5

$S_{пг} = 2\pi R_0 l_{вг}$, где $l_{вг} = \Delta L_0$ – ширина пограничной области вода-пар (см. Табл. 2), на скорость выхода радиоактивного азота из трещин U_r , являющейся искомой величиной:

$$G_N = 2\pi R_0 l_{вг} U_r.$$

Если водо-паропровод изготовлен в виде спирали радиусом $R_{сп}$ с шагом $h_{сп}$, то при длине пограничной области вода-пар равной ΔL_0 , площадь этой области $S_{пг}$ определится

выражением: $S_{\text{пр}} = (\Delta L_0 / h_{\text{сп}}) \cdot 4\pi^2 \cdot R_{\text{сп}} (R_{\text{ин}} + R_{\text{ex}}) / 2$, где $R_{\text{ин}}, R_{\text{ex}}$ – внутренний и внешний радиусы трубки водо-паропровода соответственно.

Величину l_{vr} оценивают по показанию расходомера, т.е. по величине продвижения «хода» воды в трубе водопровода 4 на его начальном участке при флуктуации в нём давления воды, которое также может быть найдено путем измерения давления воды по показанию манометра и использованием приведенного расчетного алгоритма.

При измерении давления воды с учетом ее флуктуации $\bar{P}_{\text{тр}} \pm P_{\text{гр}}$ величина $l_{\text{vr}} = \Delta L_0 = L_{0,\text{max}} - L_{0,\text{min}}$ будет зависеть от разности измеряемых давлений воды. При этом значение объёмной активности радиоактивного азота $^{16}\text{N} Q_{\text{V}0}$ (Ки/м³) при его генерации через микротрещины, возникающие в пограничной области вода-пар паропровода 5 определяется объёмной активностью в объёме парогенератора 1. Исходя из этого, перенос радиоактивного азота ^{16}N в паропровode 5 описывают следующим уравнением:

$$\frac{dQ_N}{dt} = P_{\text{в}} \{ \eta [x - (L_0 - l_{\text{vr}} / 2)] - \eta [x - (L_0 + l_{\text{vr}} / 2)] \} - \bar{v}_{\text{п}} V_{\text{п}} \alpha_N \frac{dp_{\text{п}}}{dx} - \lambda Q_N$$

где L_0 – длина водопровода 4.

В приведенном уравнении первый член в правой части описывает генерацию радиоактивного азота ^{16}N в пограничной области вода-пар шириной $l_{\text{vr}} \ll L_0$; $\eta(x)$ – единичная функция; второй – убыль радиоактивного азота, содержащегося в паре, за счёт выноса последнего по паропроводу 5 на турбину 2, третий – убыль радионуклида за счёт радиоактивного распада азота ^{16}N с постоянной распада λ . Вынос радиоактивного азота с паром из паропровода 5, представленного вторым членом в уравнении, зависит от адвективной скорости, определяемой формулой Сен-Венана, определяющей истечение газа из резервуара в атмосферу как функции его температуры и давления и для азота, должно быть несколько отличным от пара, поскольку постоянная адиабаты в упомянутой формуле для азота и пара отличаются (см. Табл. 3).

Показатели адиабаты k для различных температур и газов									
темп., °C	газ	k	темп., °C	газ	k	темп., °C	газ	k	
-181	H ₂	1,597	200	сухой воздух	1,398	20	NO	1,400	
-76		1,453	400		1,393	20	N ₂ O	1,310	
20		1,410	1000	1,365	-181	N ₂	1,470		
100		1,404	2000	1,088	15		1,404		
400		1,387	0	CO ₂	1,310	20	Cl ₂	1,340	
1000		1,358	20		1,300	-115	CH ₄	1,410	
2000	1,318	100	1,281		-74		1,350		
20	He	1,660	400		1,235		20	1,320	
20		1,330	1000		1,195	15	NH ₃	1,310	
100	насыщенный водяной пар	1,324	20		CO	1,400	19	Ne	1,640
200		1,310	-181	1,450		19	Xe	1,660	
-180	Ar	1,760	-76	O ₂	1,415	19	Kr	1,680	
20	сухой воздух	1,670	20		1,400	15	SO ₂	1,290	
0		1,403	100		1,399	360	Hg	1,670	
20		1,400	200		1,397	15	C ₂ H ₆	1,220	
100		1,401	400		1,394	16	C ₃ H ₈	1,130	

Значение постоянной адиабаты для заданного диапазона температур получают методом экстраполяции, используя полученную параболическую зависимость $k(T)$, которой аппроксимировали данные по пару, приведенные в табл. 4, при этом среднее значение постоянной адиабаты составляло $k_{cp} = \bar{k} = 1,303$. Поскольку в формуле Сен-Венана, определяющей истечение газа из резервуара в атмосферу как функции его температуры и давления, давление пара (см. фиг. 1) значительно больше атмосферного давления, то скорости выхода пара и азота ^{16}N будут, в основном, определяться их температурой и значением постоянной адиабаты. Поэтому, используя данные табл. 3 для азота и насыщенного пара при $T = 20^\circ\text{C}$ (H_2O) и $T = 15^\circ\text{C}$ (N_2), находят, что относительная погрешность скорости выброса азота $^{16}\text{N}_7$ относительно пара составит не больше 7%, т.е. в пределах погрешности измерения скорости выброса пара. Последнее позволяет принять, это отличие незначительным и считать, что и вынос радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ из паропровода происходит со скоростью выноса пара. Подставляя правую часть уравнения:

$$\frac{d\rho_{\text{п}}}{dT} = \varphi(T) \frac{S_{\text{п}} \cdot L_s}{V_{\text{п}} \cdot b_t} - \frac{\rho_{\text{п}} \cdot L_s}{(L_s - L_0) \cdot b_t} \text{ м}$$

в уравнение:

$$\frac{dQ_N}{dt} = P_{\text{в}} \{ \eta [x - (L_0 - l_{\text{вр}}/2)] - \eta [x - (L_0 + l_{\text{вр}}/2)] \} - \bar{v}_{\text{п}} V_{\text{п}} \alpha_N \frac{d\rho_{\text{п}}}{dx} - \lambda Q_N$$

получают окончательное уравнение для активности азота $Q_N(x, t)$:

$$\frac{dQ_N}{dt} = P_{\text{в}} \{ \eta [x - (L_0 - l_{\text{вр}}/2)] - \eta [x - (L_0 + l_{\text{вр}}/2)] \} + \frac{\bar{v}_{\text{п}} V_{\text{п}} \alpha_N}{(L_s - L_0)} \left[\rho_{\text{п}}(T) - \varphi(T) \frac{2L_0}{R_0} \right] - \lambda Q_N, ,$$

решение которого при $L_0 \leq x \leq L_s$ принимает вид:

$$Q_N(x, t) = \left\{ P_{\text{в}} \{ \eta [x - (L_0 - l_{\text{вр}}/2)] - \eta [x - (L_0 + l_{\text{вр}}/2)] \} + \frac{\bar{v}_{\text{п}} V_{\text{п}} \alpha_N}{(L_s - L_0)} \left[\rho_{\text{п}}(T) - \varphi(T) \frac{2L_0}{R_0} \right] \right\} \frac{[1 - \exp(-\lambda t)]}{\lambda} + Q_N(L_0) \exp(-\lambda t), ,$$

в котором температура зависит от x , а постоянная $Q_N(L_0)$ подлежит определению.

При найденной функции активности пара $Q_N(x, t)$ и плотности пара уточняют ранее введенный параметр α_N , который можно получить на выходе пара из паропровода в точке $x = L_s$ ($T_s = T_0 + b_t$ °C), исключая протечку, поскольку $P_{\text{н}}(x) \notin [(L_0 + l_{\text{вр}}/2) \leq x \leq L_s]$, в момент времени, соответствующий выходу пара из паропровода $t = \tau_{\text{п}} = (L_s - L_0) / \bar{v}_{\text{п}}$ при $P_{\text{гр}} = 6,4$ МПа, $L_s = 20$ м, $L_0 = 0,9063$ м, $\bar{k} = 1,303$ и

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

$$\alpha_N = \frac{Q_N[(L_s - L_0), \tau_{\text{п}}]}{m_{\text{п}}(L_s - L_0)} = \frac{\bar{v}_{\text{п}} V_{\text{п}} \alpha_N}{V_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}}(T_s)} \left[\rho_{\text{п}}(T_s) - \varphi(T_s) \frac{2L_0}{R_0} \right] \frac{[1 - \exp(-\lambda \tau_{\text{п}})]}{\lambda} + \frac{Q_N(L_0) \exp(1 - \lambda \tau_{\text{п}})}{V_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}}(T_s)} .$$

При этом скорость пара при его выходе из паропровода $\bar{v}_{\text{п}}$ при указанных на фиг. 1

значениях температуры и давления, согласно оценкам, составляет примерно 1512 м/с. При таких скоростях выхода пара на рабочие лопатки турбины 2 развивалась бы очень высокая радиальная скорость турбины 2, что повлекло бы значительный рост центробежной силы, которая бы привела к колоссальному росту напряжений в диске турбины 2 и особенно рабочих лопатках, 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.

Выражение для параметра α_N [Ки/кг], которое позволяет определить искомое значение активности азота $Q_N(L_0)$ в пограничной области вода-пар паропровода 5:

$$\alpha_N = Q_N(L_0) \exp(-\lambda \tau_{\text{п}}) / \left\{ V_{\text{п}} \rho_{\text{п}}(T_s) + \frac{\bar{v}_{\text{п}} V_{\text{п}}}{(L_s - L_0)} \left[\varphi(T_s) \frac{2L_0}{R_0} - \rho_{\text{п}}(T_s) \right] \frac{[1 - \exp(-\lambda \tau_{\text{п}})]}{\lambda} \right\}.$$

Величину параметра α_N определяют по оценке мощности дозы, создаваемой гамма-излучением азота ^{16}N , из математического которой находят объемную активность.

Далее находят мощность дозы γ -излучения азота ^{16}N при выходе пара в воздушную среду с образованием сферического облака диаметром $l = v_0 \cdot \tau_{\text{п}}$, где v_0 – скорость распространения пара в воздухе, которая по данным измерений составляет от 6 до 50 м/с; $\tau_{\text{п}}$ – время прохождения пара в паропроводе 5 длиной $L = L_s - L_0$, оценка которого составляет величину $\tau_{\text{п}} \sim 13 \cdot 10^{-3}$ с. С этой целью используют формулу 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; $D'_{\text{sf}} = 2\pi K_{\gamma} Q_V(L)$, где D'_{sf} – измеряемая величина мощности дозы (м³в/ч) в выделенном сферическом объеме радиоактивного пара $V_{\text{sf}} = \pi l^3/6$; $K_{\gamma} = 14,652$ [м³в·м²/ч·Ки] – γ -постоянная азота ^{16}N , $Q_V(L)$ – виртуальная объемная активность радионуклида ^{16}N (Ки/м³) на выходе из паропровода 5, возникающая за указанный промежуток времени $\tau_{\text{п}}$, определяемая отношением:

$$Q_V(L) = D'_{\text{sf}} / 2\pi K_{\gamma} l.$$

Значение плотности пара $\rho_{\text{п}}(L) = 509,87$ кг/м³, а его массу на выходе из паропровода 5 в точке $x = L$ определяют как $m_{\text{п}}(L) = V_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}}(L) = \pi R_0^2 L \cdot \rho_{\text{п}}(L)$, ($m_{\text{п}}(L) = 10,905$ кг. При этом параметр α_N (Ки/кг), оценку которого получили на основе измерений мощности дозы, создаваемой гамма-излучением азота ^{16}N , находящимся в облаке пара, принимает вид:

$$\alpha_N = Q_V(L) \cdot V_{\text{sf}} / m_{\text{п}}(L) = D'_{\text{sf}} \cdot l^2 / (12\pi K_{\gamma} \cdot R_0^2 \cdot L \cdot \rho_{\text{п}}(L))$$

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 5, определяют,

как среднюю массу $m_{\text{пср}}$ пара со средней плотностью $\rho_{\text{пср}}$ и объемом $\pi R_0^2 \bar{v}_{\text{п}} \cdot \tau_{\text{п}}$, выходящего из паропровода 5 за время $\tau_{\text{п}}$ со средней скоростью $\bar{v}_{\text{п}} = 1415$ м/с. 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 находиться в диапазоне $1,102 \cdot 10^{-6} - 1,723 \cdot 10^{-6}$ Ки/кг, а активность сосредоточенного изотопного источника $Q_N(L_0)$, создаваемого радиоактивным азотом в области границы раздела вода-пар, за время $\tau_{\text{п}}$ находят из формулы для определения активности азота в пограничной области вода-пар паропровода 5:

$$Q_N(L_0) = \alpha_N \cdot \left\{ V_{\text{п}} \rho_{\text{п}}(T_s) + \frac{\bar{v}_{\text{п}} V_{\text{п}}}{(L_s - L_0)} \left[\varphi(T_s) \frac{2L_0}{R_0} - \rho_{\text{п}}(T_s) \right] \frac{[\exp(\lambda \tau_{\text{п}}) - 1]}{\lambda} \right\}.$$

Подставляя известные величины получают объемную активность $Q_V(L_0) = 0,55$ Ки/м³.

Для измерения радиоактивности пара на радиационном фоне реактора используют гамма-детекторы, основанные на разностном методе ионизационных токов измерительной аппаратуры, состоящей, например, из проточной и непроточной ионизационных камер, одна из которых будет измерять радиационный фон реактора, а вторая – регистрировать как радиационный фон движущейся радиоактивной среды (радиоактивного пара), так и радиационный фон реактора.

В случае, рассматриваемом в настоящем изобретении содержание радионуклида радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ ($T_{1/2} = 7,11$ с, с энергией бета-излучения 6,134 МэВ и квантовым выходом 69%; энергиями бета-излучения 4,288 МэВ, и выходом бета-частиц 68%, 10,419 МэВ и 26%) в струе пара парогенератора 1, поступающего на турбину 2, свидетельствующего о признаке нарушения герметичности водопровода 4 или паропровода 5 второго контура парогенератора 1 определяют путём использования сцинтилляционных детекторов с кристаллом NaJ(Tl), в силу высокой энергии гамма-, бета-излучения, по эффекту образования пара, при выходе пара на турбину 2.

Разность показаний измерительных приборов определит вклад радиационного фона движущейся радиоактивной среды в диапазоне скоростей ее переноса от 0,2 до 10 – 12 м/с.

Объемную активность азота Q_V [Ки/м³], возникающего в паропровode 5 в области границы раздела вода-пар, определяют по формуле:

$$Q_V = Q_N(L_0) / (\pi R_0^2 l_{\text{вр}}),$$

где R_0 – внутренний радиус водопровода 4 и паропровода 5; $l_{\text{вр}} = \Delta L_0 = L_{0,\text{max}} - L_{0,\text{min}}$ [м] - разность хода измеряемых флуктуаций давления воды.

Используя найденные значения активности азота в области границы раздела вода-пар за время $\tau_{\text{п}}$, находят величину мощности вброса радиоактивного азота P_B из первого контура во второй:

$$P_B = Q_V(L_0) \cdot 2\pi R_0 l_{\text{вр}} \cdot U_{\Gamma} \approx 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ Ки/с.}$$

Величину секундного вброса G_N [м³/с] радиоактивного азота в область границы раздела вода-пар находят, используя выражение, определяемое отношением мощности вброса P_B к объемной активности Q_V :

$$G_N = P_B / Q_V(L_0) = 3,64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Скорость вброса:

$$U_T = G_N / S_B = R_0 v_{\text{пср}} / 2L = 0,116 \text{ м/с}.$$

5 Сравнивают полученные результаты измерения мощности дозы и предельной концентрацией радионуклида в помещении на выходе паропровода 5 на турбину 2 с нормативными данными, обеспечивающие безопасную работу персонала, принимают соответствующие решения: продолжить работу, поскольку выход радионуклида не приводит к превышению норм по радиационной безопасности; провести
10 профилактические работы – провести дегазацию помещения; провести временный останов оборудования и провести ремонтные работы.

(57) Формула изобретения

1. Способ определения области протечки радиоактивного азота в парогенераторах ядерных реакторов типа КЛТ-40, характеризующийся тем, что область протечки в
15 трубопроводе парогенератора определяют путем определения: плотности распределения воды $\rho_B(T)$, поступающей в водопровод парогенератора как функции температуры при её переносе вдоль оси X по водопроводу, плотности пара $\rho_{II}(T)$ как функции температуры или расстояния x при его переносе вдоль оси X по паропроводу при
20 спрямлении его спиральной части, при этом эффективную длину водопровода, в пограничной области которой возникла протечка, определяют как расстояние x_L , при котором давление воды и пара в водо-паропроводе парогенератора уравновешено, активности радионуклида $^{16}\text{N}_7$ в области «вброса» из первого контура во второй, а
25 также площади «вброса», отличающийся тем, что наличие радионуклида в паре определяют по измеренному значению мощности дозы ионизирующего излучения и плотности пара в точке выхода пара на турбину через приведенный размерный коэффициент α_N , характеризующий содержание радиоактивного азота в единице массы пара в точке выхода пара на турбину при его прохождении по паропроводу длиной L, расстояние x_L определяют путем решения уравнения
30

$$R \rho_{II}(L_0) \cdot \frac{(T_0 + 273) \cdot L_s + b_i \cdot L_0}{L_s} + \frac{L_s}{R_0 b_i} \cdot \sqrt{\frac{2P_{\text{гр}}}{N \bar{\rho}_B}} \cdot \int_{T_0}^{T(L_0)} u_{II}(T') dT' = \sqrt{\frac{P_{\text{гр}}}{2N \bar{\rho}_B}} \cdot \frac{G}{\pi R_0^2} + \frac{P_{\text{гр}}}{N \bar{\rho}_B} \cdot \rho_B(L_0),$$

где R – газовая постоянная, $\rho_{II}(L_0)$, $\rho_B(L_0)$ плотности пара и воды в точке $x_L \equiv L_0$
35 соответственно, $P_{\text{гр}}$ – давление воды, а площадь «вброса» в области протечки находят по разности расстояний x_L , возникающих в результате флуктуации давления воды в области протечки, при которых также имеет место соответствующее равенство давлений воды и пара.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что приведенный размерный коэффициент α_N
40 определяют по формуле $\alpha_N = Q_V(L) \cdot V_{\text{sf}} / m_n(L) = D'_{\text{sf}} \cdot l^2 / (12\pi K_{\gamma} \cdot R_0^2 \cdot L \cdot \rho_{II}(L))$, где $D'_{\text{sf}} = 2\pi K_{\gamma} Q_V(L)$ – измеряемая величина мощности дозы в выделенном сферическом объеме радиоактивного пара $V_{\text{sf}} = \pi l^3 / 6$ диаметром l, K_{γ} – γ -постоянная азота $^{16}\text{N}_7$, $Q_V(L)$ –
45 виртуальная объемная активность радионуклида ^{16}N (Ки/м³) на выходе из паропровода длиной L, возникающая за промежуток времени τ_{II} .

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что приведенный размерный коэффициент α_N

определяют, измеряя мощность дозы γ - β -излучения на выходе пара из паропровода, количество воды, образующейся при конденсации этого пара на выходе паропровода, температуру этого пара на выходе и определяя объем его выброса.

5

10

15

20

25

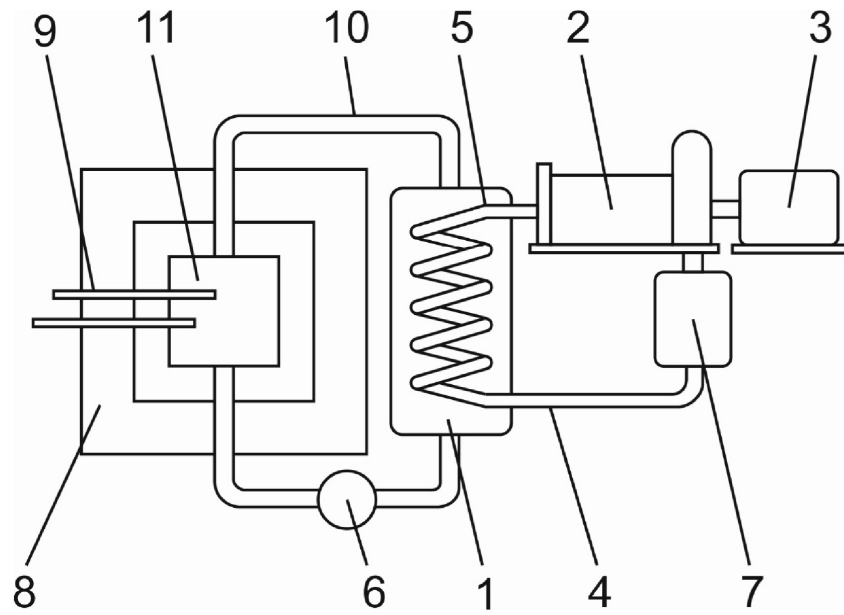
30

35

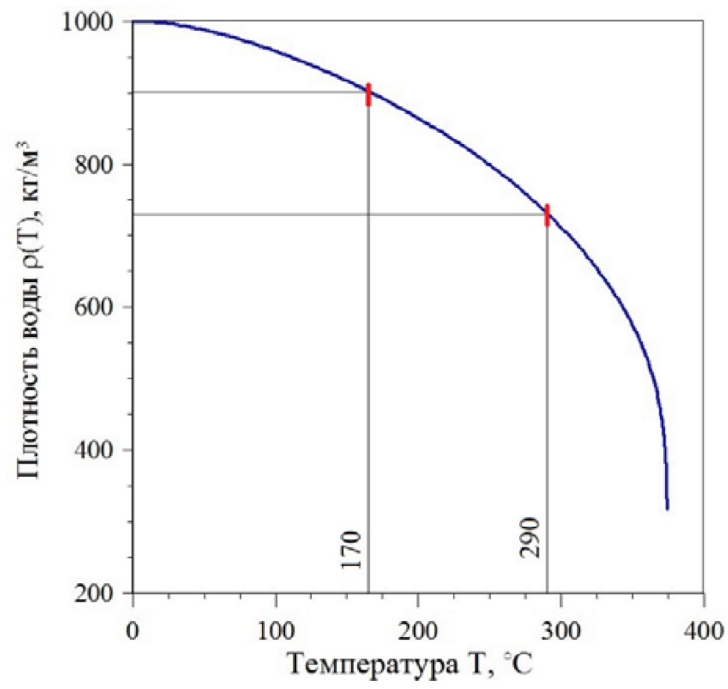
40

45

1

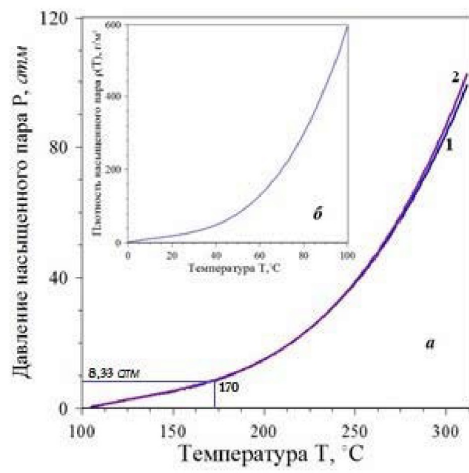


Фиг.1

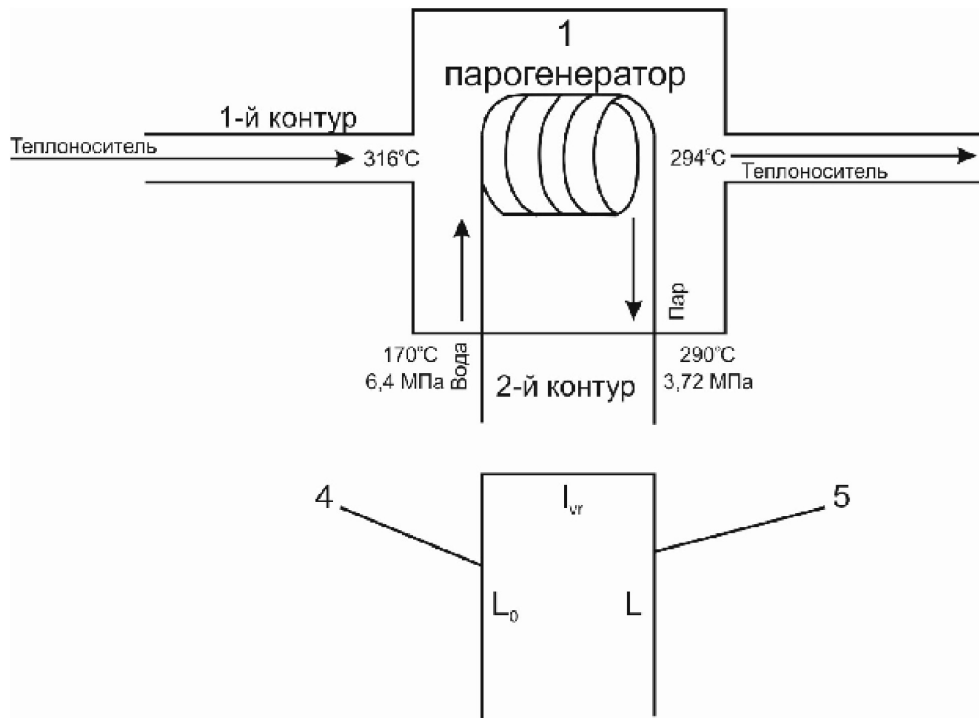


Фиг.2

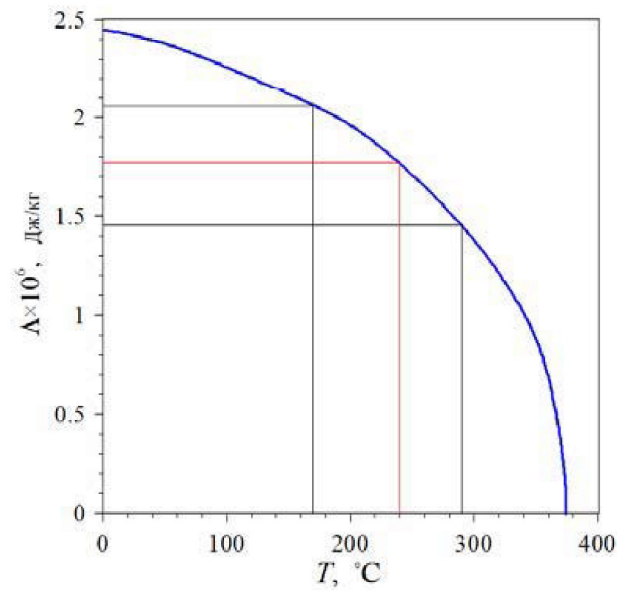
2



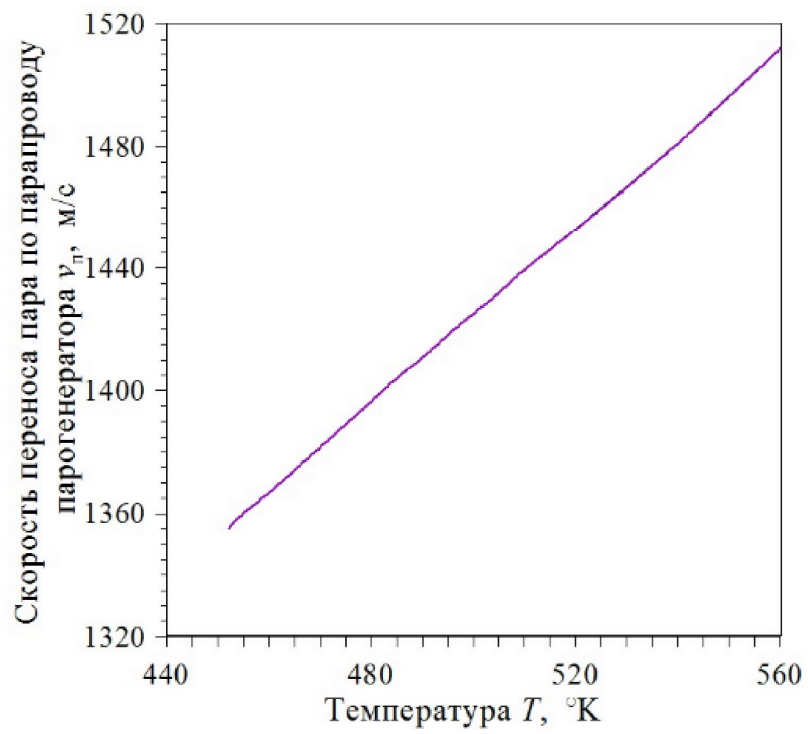
Фиг.3



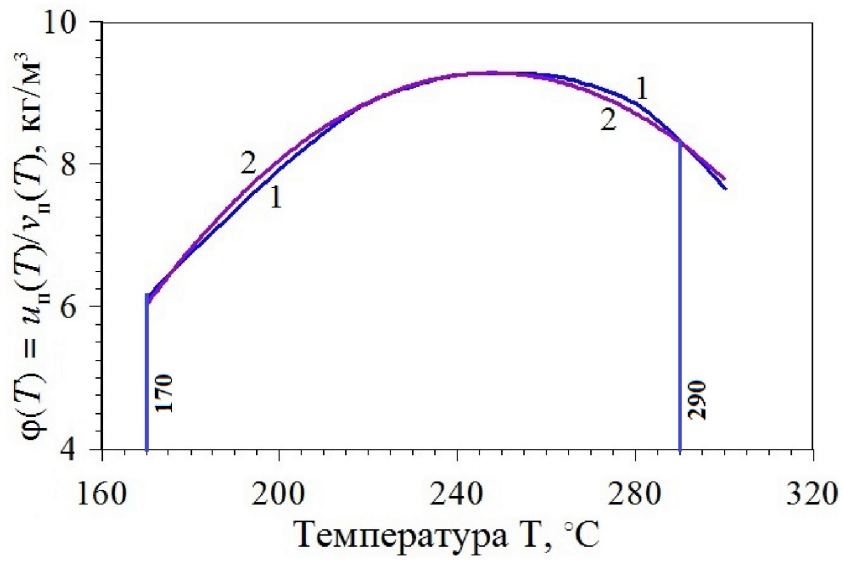
Фиг.4



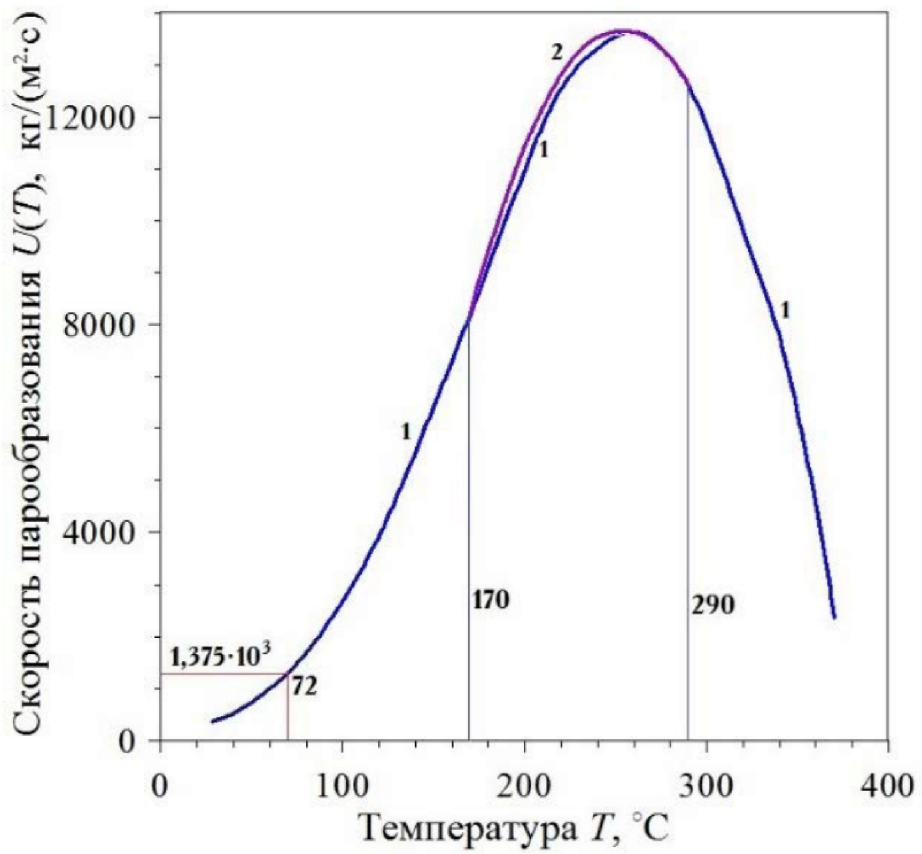
Фиг.5



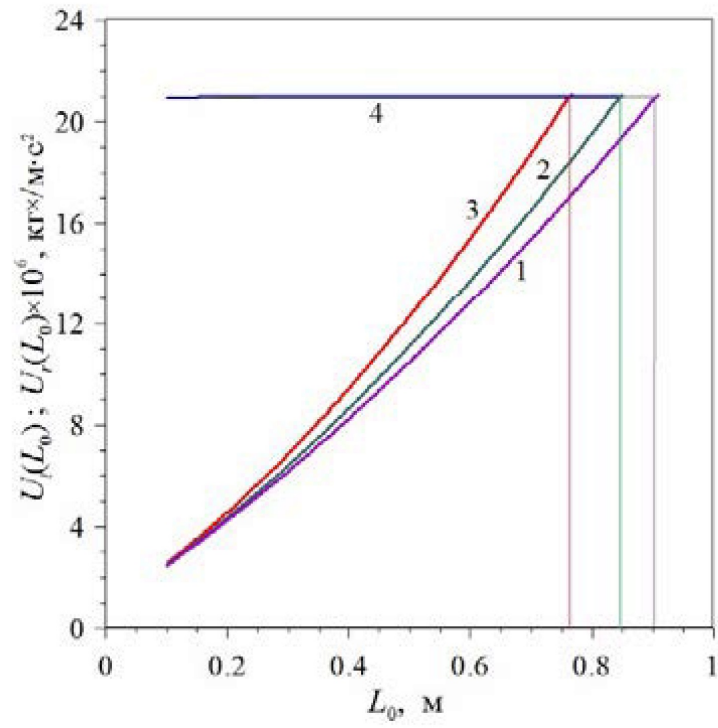
Фиг.6



Фиг.7



Фиг.8



Фиг.9