

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-06>

EDN TMALXU

Оригинальная статья / Original paper



Управление старением динамически нагруженных трубопроводов

С.Б. Кравец¹  , М.М. Костикова¹, С.А. Кузин²  , А.Ю. Смолин² , А.Е. Дембицкий²

¹ ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»,
г. Москва, Российская Федерация

 kravets_sb@mail.ru

² Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

 VITikafAE@mephi.ru

Аннотация. В РФ требования к управлению старением (ресурсом) трубопроводов, отнесенных в проектах блоков атомных станций (далее – АС) в соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии к элементам 1, 2 и 3 классов безопасности, установлены в НП-096-15. Для динамически нагруженных трубопроводов АС одним из наиболее «опасных» нагружающих факторов являются именно вибрационные нагрузки, так как для реальных конструкций трубопроводов АС значения коррозионно-эрозионного износа не велики вследствие применения коррозионностойких сталей и ограничения скорости протекающей среды (согласно НП-068-05 скорость воды – до 5 м/с, а пара и газа – до 60 м/с). Рассмотрены вопросы управления старением динамически нагруженных трубопроводов. Предложено использование расчетно-экспериментального метода для определения напряженно-деформированного состояния трубопровода при вибрационном воздействии с целью определения повреждаемости при циклически повторяющихся нагрузках. Рекомендовано в качестве ресурсной характеристики при вибрационном нагружении трубопровода использовать не нормируемые частоты или амплитуды колебаний, а значения накопленных и предельных повреждений.

Ключевые слова: паропроводы, трубопроводы АС, вибронапряжения, виброперемещения, эксплуатационные режимы, расчетная температура, допускаемая амплитуда напряжений.

Для цитирования: Кравец С.Б., Костикова М.М., Кузин С.А., Смолин А.Ю., Дембицкий А.Е. Управление старением динамически нагруженных трубопроводов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1): 60–66. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-06>

For citation: Kravets S.B., Kostikova M.M., Kuzin S.A., Smolin A.Y., Dembitskiy A.E. Aging management of dynamically loaded pipelines. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):60–66. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-06>

Aging management of dynamically loaded pipelines

Sergey B. Kravets¹  , Marina M. Kostikova¹, Sergey A. Kuzin²  ,
Alexander Y. Smolin² , Artyom E. Dembitskiy²

¹ Scientific and Technical Centre for Nuclear and Radiation Safety (SEC NRS), Moscow, Russian Federation
 kravets_sb@mail.ru

² Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation
 VITikafAE@mephi.ru

Abstract. In the Russian Federation the requirements for aging (life) management of pipelines which in the designs of nuclear power plant (hereinafter - NPP) units in accordance with the federal norms and rules in the field of nuclear energy use to the elements of 1, 2 and 3 safety classes, are established in NP-096-15. One of the most “dangerous” loading factors for dynamically loaded pipelines of NPPs is vibration loads as for real structures of NPP pipelines the values of corrosion-erosion wear are not high due to the use of corrosion-resistant steels and limitation of the flowing medium velocity (according to NP-068-05 water velocity is up to 5 m/s, and steam and gas is up to 60 m/s). The issues of aging management of dynamically loaded pipelines are considered. The use of calculation-experimental

method is proposed to determine the stress-strain state of the pipeline under vibration impact in order to determine the damageability under cyclically repeated loads. It is recommended to use the values of accumulated and ultimate damage rather than standardized frequencies or vibration amplitudes as a resource characteristic under vibration loading of the pipeline.

Keywords: steam pipelines, NPP pipelines, vibration stresses, vibration displacements, operating modes, design temperature, allowable stress amplitude.

В РФ требования к управлению старением (ресурсом) трубопроводов, отнесенных в проектах блоков атомных станций (далее – АС) в соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии к элементам 1, 2 и 3 классов безопасности, установлены в НП-096-15¹. Согласно данного нормативного документа управление ресурсом предусматривает:

- соблюдение требований нормативной документации;
- поддержание трубопроводов АС в работоспособном состоянии путем своевременного выявления повреждений, осуществления текущих ремонтов, замены выработавших ресурс элементов (участков);
- установление механизмов образования и развития дефектов, способных привести к деградации трубопроводов АС;
- выявление определяющих механизмов старения, деградации и повреждений трубопроводов АС;
- проведение мониторинга процессов старения и деградации, контроля технического состояния и оценки выработанного (остаточного) ресурса трубопроводов АС;
- ослабление процессов старения и деградации и трубопроводов посредством ремонта и модернизации, применения щадящих режимов эксплуатации.

В качестве ресурсных характеристик трубопроводов АС, согласно РБ-132-17² выступают: общая и локальная толщины стенок;

накопленное значение повреждения металла при циклически повторяющихся нагрузках; сдвиг критической температуры хрупкости металла вследствие температурного старения и циклической повреждаемости металла; вибрационные характеристики трубопровода и т.д. Таким образом, согласно РБ-132-17 усталостное повреждение металла при циклически повторяющихся нагрузках, характеризующееся предельным значением, определенным в соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии, не учитывает циклические нагрузки от вибрации. В РБ-132-17 критериями оценки ресурса для вибрационных характеристик трубопровода служат недопустимые частоты или амплитуды колебаний, приводящие к нарушениям условий прочности. По нашему мнению, для динамически нагруженных трубопроводов целесообразно не выделять в качестве ресурсной характеристики вибрационные параметры трубопровода, а рассматривать их в качестве одного из проектных режимов при оценке накопленного значения повреждения металла при циклически повторяющихся нагрузках.

Следует отметить, что для динамически нагруженных трубопроводов АС одним из наиболее «опасных» нагружающих факторов являются именно вибрационные нагрузки, так как для реальных конструкций трубопроводов АС значения коррозионно-эрозионного износа не велики вследствие применения коррозионностойких сталей и ограничения скорости протекающей среды (согласно НП-068-05³ скорость воды – до 5 м/с, а пара и газа – до 60 м/с).

¹ НП-096-15. Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения, 2015. – Режим доступа: https://docs.secncs.ru/catalog/FNP/NP_096_15/ (дата обращения: 18.11.2024).

² РБ-132-17. Установление и методы мониторинга ресурсных характеристик работающих под давлением оборудования и трубопроводов атомных станций, – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document456098885> (дата обращения: 18.11.2024).

³ НП-068-05. Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2005. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200044037> (дата обращения: 18.11.2024).

Как показывает практика, при использовании в качестве ресурсной характеристики накопленного значения повреждения металла при циклически повторяющихся нагрузках, оценка выработанного и остаточного ресурса трубопроводов для расчетных режимов, за исключением вибрационного нагружения, не представляет большой сложности, так как на этапе проектирования нагружающие факторы определяются достаточно точно.

Наиболее перспективным направлением определения накопленных повреждений трубопроводов при вибрационных нагрузках в настоящее время является расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния трубопроводов при эксплуатационных нагрузках, в том числе и вибрационных. При этом в ходе выполнения данного расчетно-экспериментального исследования учитываются факторы, которые не могут быть точно определены на стадии проектирования, а именно:

- собственные частоты трубопроводной системы, вследствие неопределенности исходных данных, связанных с жесткостью опорных конструкций, фактической толщины трубы и т.д.;

- реальные значения параметров демпфирования.

Кроме того, экспериментальные данные о собственных частотах и формах колебаний трубопровода позволяют выполнить верификацию его расчетной схемы и учесть фактическое влияние, как масс среды и теплоизоляции, так и жесткости трубопровода и опорных конструкций.

Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния трубопровода при вибрационном воздействии предлагается проводить в следующем порядке.

Принимая во внимание, что места опирания многопролетного трубопровода наиболее корректно моделируются шарнирами, а максимальные значения номинальных изгибных напряжений возникают в месте заделки, то в качестве расчетной схемы для оценки вибрационного воздействия допускается

применить схему, приведенную на рисунке 1.

Для реальных условий частотные характеристики вибрационного воздействия играют важную роль, так как именно низкочастотные колебания обладают наибольшей механической энергией. Зависимость уровня механических воздействий среды на стенки трубопровода от вынужденной частоты воздействия, обусловленной гидродинамическими силами турбулентного потока, рассмотренная в НП-068-05, приведена на рисунке 1.

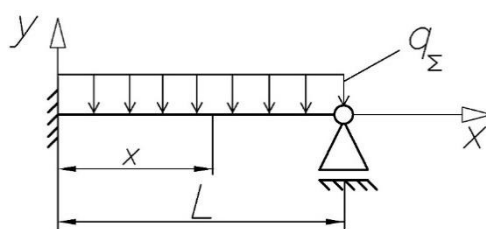


Рисунок 1. Расчетная схема участка трубопровода
Figure 1. Calculation diagram of the pipeline section

На первой стадии выполнения расчета для построения «теоретической» расчетной модели в расчетной программе, использующей метод конечных элементов (МКЭ), необходимо ввести исходные данные: геометрические параметры (длина участка трубопровода и характеристики его поперечного сечения); весовые параметры (плотность материала трубы, присоединенные массы теплоизоляции и рабочей среды, учитываемые пересчетом плотности материала трубопровода); условия закрепления. Далее в данной программе следует для разработанной модели выполнить расчеты первых (низших) пяти собственных частот и форм колебаний данной модели.

Следующим этапом является проведение экспериментальных исследований вибрационного состояния трубопровода, в ходе которых следует определить не только значения виброскорости, но и реальные значения частот и форм собственных колебаний, параметров демпфирования.

На третьем этапе необходимо выполнить доводку «теоретической» расчетной модели до «реальной», используя в качестве критерия

рия соответствия моделей значений низших собственных частот колебаний трубопроводных систем, которые наиболее точно характеризует жесткость конструкции. При доводке «теоретической» расчетной модели, как правило, следует уточнить фактические толщины трубопроводов, условия опирания (жесткость опорной конструкции, усилия затяга анкерных болтов и т.д.).

Следует отметить, что при использовании данного метода, отпадает необходимость определения точки максимального прогиба трубопровода соответствующего конкретной форме колебаний, в которой обычно устанавливают датчик контроля виброскорости.

Для определения напряженно-деформированного состояния трубопровода при вибрационном нагружении, следует для «реальной» расчетной модели использовать экспериментальные определенные значения виброскорости. При этом значения виброперемещений для гармонических колебаний можно определить по формуле (1):

$$S = (450 \times v_{\max})/f, \quad (1)$$

где S – виброперемещение, мкм;

$v_{\max}$ – максимальное значение виброскорости, мм/с;

f – частота, Гц.

Расчет напряженно-деформированного состояния трубопровода с использованием «реальной» расчетной модели может быть выполнен линейно-спектральным или динамическим методами, предусмотренными в программах, аттестованных на выполнение расчетов динамики и прочности конструкций МКЭ. При этом в программе, использующей МКЭ, необходимо также создать расчетные модели патрубковых зон (тройниковых узлов), отражающие их реальные размеры для определения коэффициентов концентрации и определения амплитуд условных упругих приведенных напряжений с учетом концентрации напряжений.

Определение циклической прочности, а также оценку выработанного и остаточного ресурса трубопроводов при воздействии вибрационных нагрузок, следует проводить в соответствии с требованиями ГОСТ Р

59115.9-2021⁴ и рекомендациям [1–2]. Данная оценка ресурса не будет иметь излишний консерватизм, так как в процессе расчета будут использованы расчетные модели, жесткостные характеристики которых подтверждены экспериментально.

Практическую реализацию данного подхода покажем на конкретном примере. В качестве расчетной схемы примем схему, приведенную на рисунке 1 с длиной пролета $L = 5,5$ м для трубопровода, изготовленного из стали 08X18H10T с размерами ($D_{\text{нар}} = 108$ мм, $D_{\text{внутр}} = 102$ мм). Масса данного пролета с учетом теплоизоляции и заполненной жидкости (вода) составила 121,0 кг. В результате выполненных расчетно-экспериментальных обоснований было установлено, что значение первой (низшей) собственной частоты колебаний для данного расчетного случая составит 9,8 Гц.

В качестве нагружающего фактора выберем вибрационное воздействие с максимальным значением виброскорости $v_{\max} = 15$ мм/с, так как согласно ГОСТ Р 59115.11-2021 «Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок»⁹ поверочный расчет на постпроектных стадиях при максимальном измеренном значении $v_{\max} = 15$ мм/с проведение расчетов на вибропрочность трубопроводов с рабочей средой не требуется. По результатам расчетов значение виброперемещений для $v_{\max} = 15$ мм/с составило 0,69 мм.

Выполним расчет напряженно-деформированного состояния трубопровода с использованием «реальной» расчетной модели методом динамического анализа,

⁴ ГОСТ Р 59115.9. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на прочность. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2022. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200182238?ysclid=m87a1aquiz316550711> (дата обращения: 18.12.2024).

⁹ ГОСТ Р 59115.11-2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200181284?ysclid=m85zirqm61737337876> (дата обращения: 18.12.2024).

реализованного в программе «Зенит-95»⁶. Результаты оценки напряженно-деформированного состояния патрубковой зоны для виброскорости $v_{\max}=15$ мм/с приведены на рисунке 2, при этом в качестве нагружающего фактора использовались только усилия от вибрации (весовые нагруз-

ки были исключены). Как видно из графического отображения напряженно-деформированного состояния патрубковой зоны, максимальное значение местных напряжений (интенсивность напряжений) составило (σ_{aF}) = 7,6 МПа.

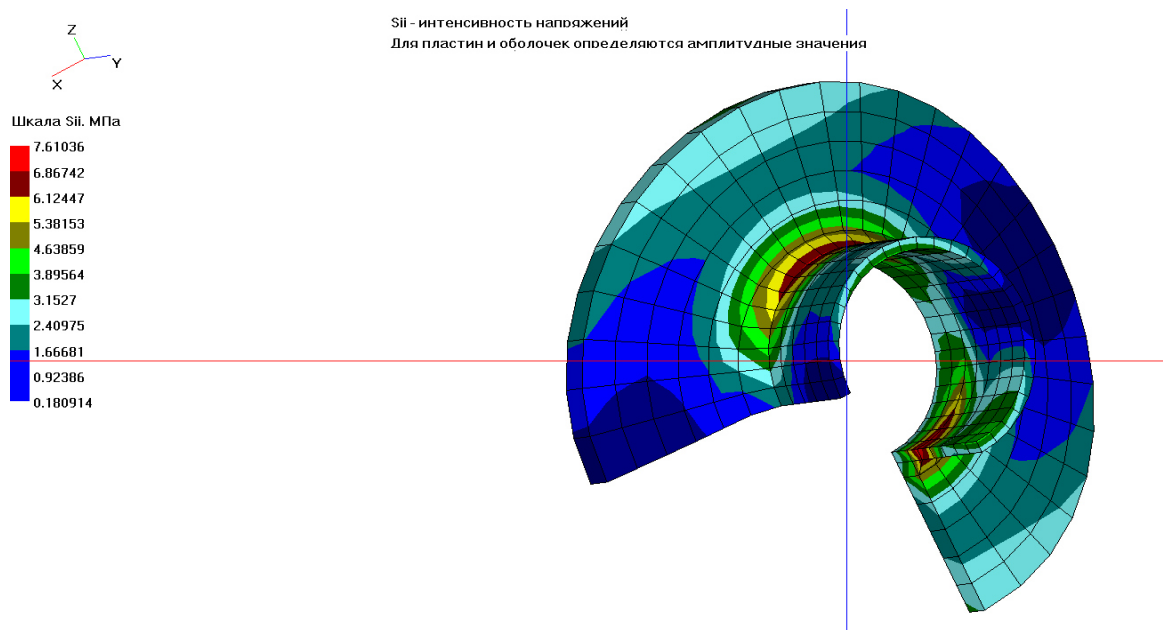


Рисунок 2. Напряжения от вибрации (без учета других факторов)

Figure 2. Vibration stresses (excluding other factors)

Выполним оценку циклической прочности согласно ГОСТ Р 59115.9-2021. Допускаемая амплитуда условного упругого напряжения или допускаемое число циклов при $[N_0] \leq 10^{12}$ (без определения коэффициента асимметрии):

$$\left\{ \begin{aligned} [\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e_c^T}{(4n_N [N_0])^m} + \frac{R_c^T - R_{p0,2}^{T_{\min}}}{(4n_N [N_0])^{m_e} - 1} \\ [\sigma_{aF}] &= \frac{E^T e_c^T}{n_\sigma (4[N_0])^m} + \frac{R_c^T - R_{p0,2}^{T_{\min}}}{n_\sigma ((4[N_0])^{m_e} - 1)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где (σ_{aF}) – амплитуда условных упругих приведенных напряжений с учетом концентрации напряжений, МПа;

n_σ, n_N – коэффициенты запаса прочности по напряжениям и числу циклов;

e_c^T – характеристика пластичности;
 R_c^T – характеристика прочности, МПа;
 $R_{p0,2}^T$ – минимальное значение условного предела текучести при температуре Т, МПа;
 E^T – модуль упругости при температуре Т, МПа;

m, m_e – вспомогательные параметры.

Максимальное количество циклов колебаний с частотой 9,8 Гц за 60 лет непрерывной работы составит примерно $1,9 \times 10^{10}$. Допускаемая амплитуда напряжений (σ_{aF}), получаемая для $1,9 \times 10^{10}$ циклов, применительно к трубе, изготовленной из 12X18Н10Т, при расчетной температуре $t = 350^\circ\text{C}$ составит $[\sigma_{aF}] = 46,4$ МПа.

Таким образом, из результатов оценки циклической прочности следует, что для расчетной схемы трубопровода, учитывающей особенности реальной конструкции, значения полученных условных упругих приведенных напряжений существенно ниже допускаемой амплитуды напряжений.

⁶ Зенит-95. Программа расчета динамики и прочности конструкций, механизмов и приводов методом конечных элементов (МКЭ). – Режим доступа: <https://ntp-dip.ru/index.html> (дата обращения: 18.12.2024).

Реализация описанных выше расчетно-экспериментальных подходов позволит уйти от необходимости нормированных вибрационных характеристик трубопроводов (частоты или амплитуды колебаний) и рассматривать вибрационное нагружение в качестве одного из проектных режимов при оценке накопленного значения повреждения металла при циклически повторяющихся нагрузках.

Выводы

В данной статье рассмотрены вопросы управления старением динамически нагру-

женных трубопроводов. Предложено использование расчетно-экспериментального метода для определения напряженно-деформированного состояния трубопровода при вибрационном воздействии с целью определения повреждаемости при циклически повторяющихся нагрузках [3–4]. Рекомендовано в качестве ресурсной характеристики при вибрационном нагружении трубопровода использовать не нормируемые частоты или амплитуды колебаний, а значения накопленных и предельных повреждений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кравец С.Б., Кузин С.А. Современные подходы к определению нормируемых параметров вибрационного состояния паропроводов. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):50–56. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-06>.

Kravets S.B., Kuzin S.A., Smolin A.Yu. Modern approaches to determining the standardised parameters of vibration state of NPP steam pipelines. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):52–57. (In Russ.). EDN: JFQRZB. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-07>

2. Аркадов Г.В., Гетман А.Ф., Родионов А.Н. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы). Москва: Энергоатомиздат, 2010. 424 с. Режим доступа: https://elbib.biblioatom.ru/text/arkadov_sistemy-diagnostirovaniya-vver_2019/p0/ (дата обращения: 20.12.2024).

3. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. Москва: Машиностроение, 1977. 232 с. Режим доступа: <https://dwg.ru/dnl/5113> (дата обращения: 20.12.2024).

4. Кузьмичевский А.Ю., Гетман А.Ф. Методика расчета прочности и ресурса оборудования и трубопроводов АЭС в вероятностном аспекте. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2010;76(8):48–50.

Kuzmichevsky A.Yu., Getman A.F. Methodology for calculating the strength and service life of NPP equipment and pipelines in a probabilistic aspect. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2010;76(8):48–50. (In Russ.).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Кравец С.Б. – анализ результатов расчетов и разработка рекомендаций;

Костикова М.М. – анализ результатов расчетов и разработка рекомендаций;

Кузин С.А. – проверка расчетов паропроводов;

Смолин А.Ю. – проведение расчетов паропроводов;

Дембицкий А. Е. – проведение расчетов паропроводов.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Kravets S.B. – analysis of calculation results and development of recommendations;

Kostikova M.M. – analysis of calculation results and development of recommendations;

Kuzin S.A. – checking steam pipeline calculations;

Smolin A.Yu. – carrying out calculations of steam pipelines;

Dembitsky A.E. – conducting calculations of steam pipelines.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования

FUNDING:

The study has no external funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сергей Борисович Кравец, начальник отдела, Национально-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, г. Москва, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0001-8297-3102>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Sergey B. Kravets, head of department, National Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0001-8297-3102>;

e-mail: kravets_sb@mail.ru

Костикова Марина Михайловна, ведущий специалист, Национально-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kostikova@secnrs.ru

Сергей Алексеевич Кузин, доцент, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-7384-5827>

e-mail: KuzinSergey55@mail.ru

Александр Юрьевич Смолин, кандидат технических наук, доцент, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-0148-2086>

e-mail: AYSmolin@mephi.ru

Артем Евгеньевич Дембицкий, кандидат технических наук, зав. кафедрой атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: demartev@yandex.ru

e-mail: kravets_sb@mail.ru

Marina M. Kostikova, Leading Specialist, National Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russian Federation;

e-mail: kostikova@secnrs.ru

Sergey A. Kuzin, Associate Professor, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-7384-5827>

e-mail: KuzinSergey55@mail.ru

Alexander Y. Smolin, Cand. Sci (Eng), Associate Professor, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-0148-2086>

e-mail: AYSmolin@mephi.ru

Artyom E. Dembitsky, Cand. Sci (Eng), Head of the Department of Atomic Energy, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: demartev@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 23.12.2024

После доработки / Revised 14.03.2025

Принята к публикации / Accepted 18.03.2025