

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.311.25:621.64

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-07>

EDN JFQRZB

Оригинальная статья / Original paper



Современные подходы к определению нормируемых параметров
вибрационного состояния паропроводов атомных станций

С.Б. Кравец ¹ , С.А. Кузин ^{2,3} , А.Ю. Смолин ³

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

² АО «Атоммашэкспорт», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

³ Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

KuzinSergey55@mail.ru

Аннотация. В процессе эксплуатации паропроводов на атомных станциях основными повреждающими факторами являются не только коррозия и эрозия, приводящие к утончению стенки трубы, но и усталостные повреждения, возникающие как из-за температурных усилий самокомпенсации, так и вследствие высокой вибрационной нагрузки. Как показывает практика, наиболее перспективным направлением обеспечения вибростойкости паропроводов в настоящее время является расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния трубопроводов при вибрационном нагружении. В данной работе определена прочность наиболее применяемых типоразмеров стальных трубопроводов при воздействии вибрационных нагрузок в соответствии с ГОСТ Р 59115.9-2021. Для принятых в рассмотрение 4-х вариантов расчетных схем были определены амплитуды условных упругих приведенных напряжений с учетом концентрации напряжений. Определена допускаемая амплитуда напряжений из условия эксплуатации 60 лет. Показано, что для трубы, изготовленной из 12X18H10T, допускаемая амплитуда напряжений для расчетной температуры $t = 350^\circ\text{C}$ составит не более 46,4 Мпа. Применительно к трубопроводам атомных станций нормируемые параметры вибрации в нормативной документации не были установлены до 2022 г., когда для трубопроводов атомных станций в ГОСТ Р 59115.11-2021 были приняты следующие предельные значения виброскорости, не требующие выполнение проверки вибропрочности: v_{max} до 15 мм/с, $v_{\text{свкз}}$ до 7 мм/с. Таким образом, в настоящее время в российской нормативной документации на трубопроводы отсутствуют нормируемые значения параметров вибрации (как правило виброскорости), выбираемые в зависимости от частоты вибрационного воздействия. Предлагается разработать и внести в нормативную документацию частотно-зависимые критерии предельных параметров вибрации для трубопроводов атомных станций, уточненные в соответствии с реальными условиями работы данных трубопроводов.

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

Для цитирования: Кравец С.Б., Кузин С.А., Смолин А.Ю. Современные подходы к определению нормируемых параметров вибрационного состояния паропроводов атомных станций. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):52–57. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-07>

For citation: 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.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-07>

Modern approaches to determining the standardised parameters of vibration state of NPP
steam pipelines

Sergey B. Kravets ¹ , Sergey A. Kuzin ^{2,3} , Aleksandr Yu. Smolin ³

¹ Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (SEC NRS), Moscow, Russian Federation

² JSC «Atommasheksport», Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation

³ Volgogradsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation

KuzinSergey55@mail.ru

Abstract. During the operation of NPP steam pipelines the main damaging factors are not only corrosion and erosion leading to thinning of the pipe wall but also fatigue damage resulting not only from temperature self-compensation efforts, but also high vibration load. As practice shows, the most promising direction of ensuring the vibration resistance of steam pipelines at present is the computational and experimental study of the stress-strain state of pipelines under vibration loading. This work shows that the strength of the

most commonly used standard sizes of steel pipelines under the influence of vibration loads is determined in accordance with Russian State Standard R 59115.9-2021. Taking into account the stress concentration, the amplitudes of the conditional elastic reduced stresses were determined for the 4 variants of the calculation schemes accepted for consideration. The permissible amplitude of stresses from an operating condition of 60 years is determined. It is shown that the permissible voltage amplitude for the design temperature $t = 350^{\circ}\text{C}$ will be no more than 46.4 Mpa for a pipe made of 12X18H10T. As for NPP pipelines, the normalized vibration parameters in the regulatory documentation were not established until 2022, when the following vibration velocity limits were adopted for pipelines of nuclear power plants in Russian State Standard R 59115.11-2021, vibration resistance testing is not required: n_{max} up to 15 mm/s, n_{msv} up to 7 mm/s. Thus, currently in the Russian regulatory documentation there are no normalized values of vibration parameters (as a rule, vibration velocity) for pipelines selected depending on the frequency of vibration exposure. It is proposed to develop and introduce into the regulatory documentation frequency-dependent criteria for limiting vibration parameters of NPP pipelines, specified in accordance with the actual operating conditions of these pipelines.

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

Введение

В процессе эксплуатации паропроводов на атомных станциях (далее – АС) основными повреждающими факторами являются не только коррозия и эрозия, приводящие к утонению стенки трубы, но и усталостные повреждения, возникающие вследствие не только температурных усилий самокомпенсации, но и высокой вибрационной нагрузки. К сожалению, вопросы определения нормируемых параметров вибрационного состояния трубопроводов в отечественной нормативной документации практически не отражены, что вызвано в первую очередь большим разнообразием конструкций паропроводов и различием подходов к определению напряженно-деформированного состояния паропроводов при вибрационном нагружении.

Как показывает практика, наиболее перспективным направлением обеспечения вибростойкости паропроводов в настоящее время является расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния трубопроводов при вибрационном нагружении.

В РФ первые нормируемые параметры вибрации трубопроводов пара и горячей воды были установлены в РД-10-249-98¹, согласно которому, для определения вибрационного состояния трубопровода необходимо определить точки трубопровода с максимальными значениями виброскорости, в которых производятся измерения максимальных скоростей v_{max} , сравниваемых с нормируемыми значениями виброскорости – v . Нормируемые значения в РД-10-249-98 установлены следующим образом:

- при значениях v_{max} до 15 мм/с не требуется проверки вибропрочности;
- при значениях $v_{\text{max}} = 15\text{--}25$ мм/с требуется расчетная проверка на основании подробных измерений (с определением спектров виброскоростей);

– при значениях v_{max} свыше 25 мм/с принимаются меры для снижения вибрации.

Применительно к трубопроводам АС нормируемые параметры вибрации в нормативной документации не были установлены до 2022 г., когда для трубопроводов атомных энергетических установок в ГОСТ Р 59115.11-2021² были приняты следующие предельные значения виброскорости, не требуется выполнение проверки вибропрочности: v_{max} до 15 мм/с, $v_{\text{кз}}$ до 7 мм/с.

Таким образом, в настоящее время в российской нормативной документации на трубопроводы отсутствуют нормируемые значения параметров вибрации (как правило, виброскорости), выбираемые в зависимости от частоты вибрационного воздействия.

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 Рекомендациях для предотвращения вибрационного усталостного разрушения трубопроводов³, приведена на рисунке 1. Как видно, наибольший уровень кинетической энергии потока, воздействующий на трубопровод, сосредоточен в диапазоне до 10 Гц. Таким образом, очевидно, что нормирование значения параметров вибрации без учета частоты вибрационного воздействия, является избыточно консервативным.

Рассмотрим подходы к определению нормируемых параметров вибрационного состояния трубопроводов, применяемых в мировой практике.

² ГОСТ Р 59115.11-2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на постпроектных стадиях. – Москва: Российский институт стандартов, 2021. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/75973/> (дата обращения: 09.11.2023).

³ Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework. 2nd Edition. Energy Institute. London, 2008. – Режим доступа: <https://dokumen.tips/documents/guidelines-for-the-avoidance-of-vibration-induced-fatigue-failure-in-process.html> (дата обращения: 13.11.2023).

¹ РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. Постановление Госгортехнадзора РФ от 25.08.1998 №50 (ред. от 13.07.2001). – Москва: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2001. – 244 с. – Режим доступа: <https://tk-servis.ru/lib/637/> (дата обращения: 09.11.2023).

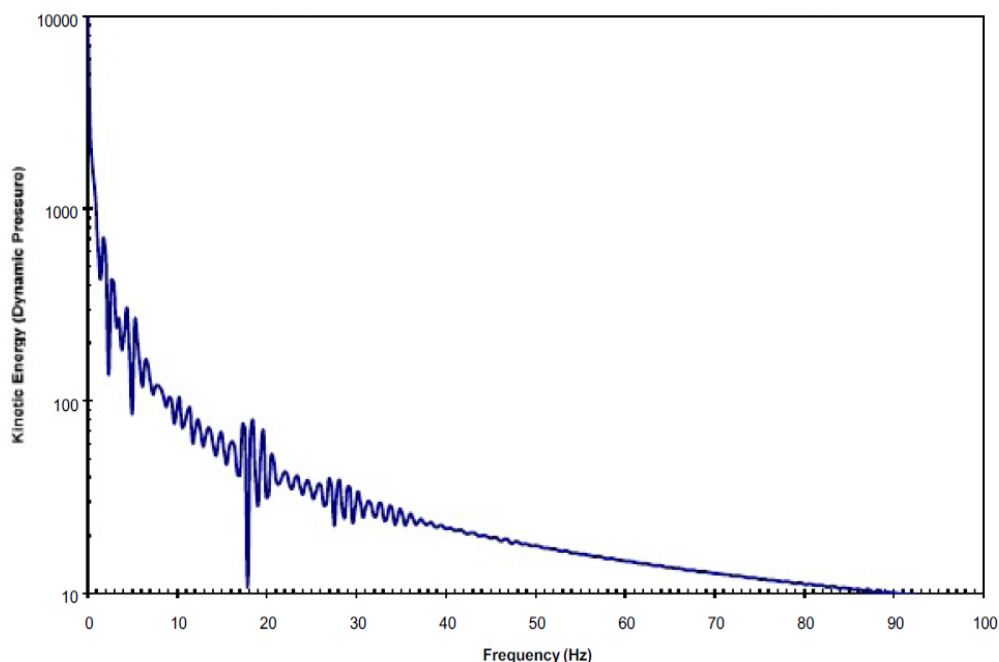


Рисунок 1. Зависимость уровня возбуждения трубопровода от вынуждающей частоты воздействия турбулентного потока среды ³ [3]

Figure 1. Dependence of pipeline excitation level on forcing frequency of turbulent medium flow ³ [3]

Одним из первых документов, в котором предложены частотно-зависимые критерии предельных параметров вибрации $v_{скз}$, был VDI 3842 ⁴. Частотно-зависимые критерии $v_{скз}$ представлены на рисунке 2.

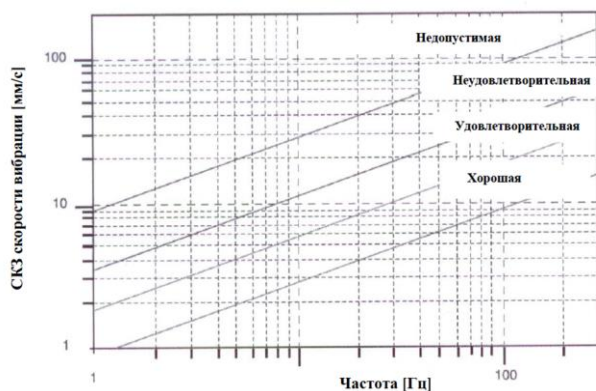


Рисунок 2. Частотно-зависимый критерий $v_{скз}$ (по VDI 3842) ⁴

Figure 2. Frequency-dependent n_{msv} criterion (according to VDI 3842) ⁴

В Правилах ASME ⁵, посвященных технологическим трубопроводам, учет вибрационного воздей-

ствия предлагают выполнять с учетом «Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework». Частотно-зависимые критерии предельные параметры вибрации, согласно «Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework», представлены на рисунке 3. Согласно «Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework», если уровень вибрации превышает критерий «Problem (Проблема)», то существует высокий риск возникновения усталостного повреждения. В этом случае следует немедленно принять меры по контролю вибрации и/или немедленно провести прямое измерение динамической деформации, чтобы точно определить вероятность отказа. Проверки следует проводить немедленно на соответствующих сварных швах неразрушающим способом, чтобы гарантировать, что усталостные трещины не возникнут. Уровень вибрации, превышающий критерий «Concern (Обеспокоенность)» на рисунке 3, означает, что существует вероятность возникновения усталостного повреждения. В этом случае следует принять меры по контролю вибрации и/или провести прямое измерение динамической деформации, чтобы точно определить вероятность отказа. Проверки соответствующих сварных швов должны выполняться неразрушающим способом, чтобы убедиться в отсутствии усталостных трещин.

⁴ VDI 3842. Vibrations in piping systems. Verein Deutscher Ingenieure, 2004. 87 p. — Режим доступа: <https://standards.globalspec.com/std/18809/VDI203842> (дата обращения: 13.11.2023).

⁵ ASME B31.3-2016. Сборник правил ASME для трубопроводов, работающих под давлением (Системы технологических трубопроводов). — Режим доступа:

<https://www.engineerdocuments.com/standards/ASME-B31-3-2016/> (дата обращения: 09.11.2023).

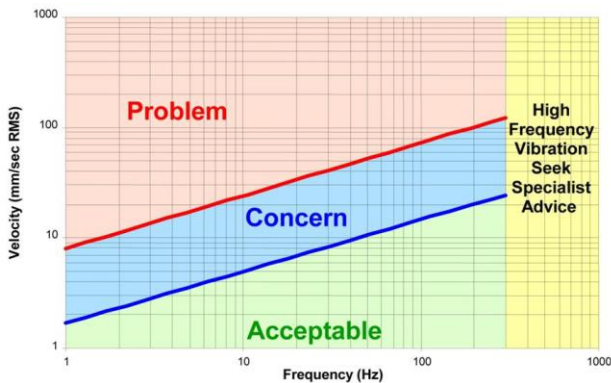


Рисунок 3. Частотно-зависимый критерий n_{msv} [Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework]

Figure 3. Frequency-dependent n_{msv} criterion [Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework]

Для оценки уровня напряжений, возникающих в элементах трубопровода при вибрационном воздействии, рассмотрим максимально возможные изгибные напряжения для расчетной схемы, приведенной на рисунке 4. В рассмотрение была принята схема, так как наибольший уровень изгибных напряжений, возникающих в трубопроводе, будет для схемы с жесткой заделкой.

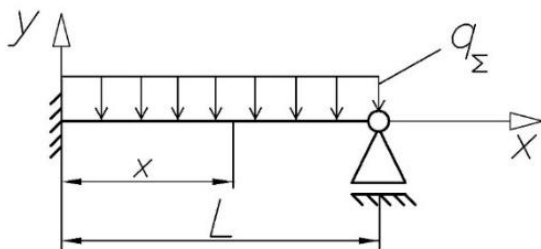


Рисунок 4. Расчетная схема участка трубопровода [составлено авторами]

Figure 4. Calculation diagram of the pipeline section [compiled by the authors]

Принимая во внимание информацию, приведенную на рисунке 1, согласно которой с уменьшением жесткости трубопроводной системы, растут механические нагрузки от гидродинамических воздействий, выберем для указанной схемы максимальные значения из регламентированных в нормативной документации расстояний между опорами. Предельные (максимальные) расстояния между опорами трубопроводов выбраны в соответствии с авторитетными источниками [1–4].

Расчет собственных частот участка трубопроводной системы проводился аналитическим способом с использованием следующих исходных данных: трубопровод заполнен жидкостью с плотностью $\rho=1000$ кг/м³; покрыт тепловой изоляцией толщиной 50 мм, выполненной из материала с плотностью $\rho=200$ кг/м³. Результаты расчета собственных частот приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения первых собственных частот [составлено авторами]

Table 1. Values of the first natural frequencies [compiled by the authors]

№	Типоразмер, D _{нар} x S _{ст} , мм	Длина пролета, м	Масса пролета, кг	Первая (низшая) собственная частота, Гц
1	57x3,5	4,0	39,7	10,3
2	76x3,0	4,0	52,8	13,0
3	89x3,5	5,0	85,1	10,0
4	108x3,5	5,5	121,0	9,8

Как видно из представленных в таблице 1 результатов, минимальное значение первой собственной частоты составляет приблизительно 10 Гц. Определим значение изгибных напряжений, возникающих в трубопроводе при нормированном согласно ГОСТ Р 59115.11-2021 максимальном значении виброскорости $v_{max} = 15$ мм/с.

Значение 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.

Значения номинальных изгибных напряжений, возникающих в месте заделки при смещении точки максимального прогиба трубопровода, соответствующей первой форме колебаний, на расстояние S , для расчетной схемы, приведенной на рисунке 4, определялись при помощи расчетного комплекса «Зенит-95»⁶, использующего МКЭ.

Определение значений изгибных напряжений в месте заделки трубопровода проводилось в следующем порядке. На первой стадии выполнения расчета вводились геометрические размеры элемента трубопровода (длина участка), затем характеристики его поперечного сечения, весовые параметры (размер поперечного сечения трубы; масса теплоизоляции и среды, учитываемая пересчетом плотности материала трубопровода) и условия закрепления. Для полученной расчетной модели выполнялась оценка ее соответствия теоретической (эталонной) модели, использованной для определения первых собственных частот (см. табл. 1). В качестве критерия соответствия модели, разработанной при помощи расчетного комплекса «Зенит-95», аналитической модели, было выбрано значение собственной частоты колебаний конструкции, которая наиболее точно характеризует жесткость конструкции. Расчеты первых (низших) пяти собственных частот и форм колебаний выпол-

⁶ Зенит-95. Программа расчета динамики и прочности конструкций, механизмов и приводов методом конечных элементов (МКЭ). – Режим доступа: <https://ntp-dip.ru/> (дата обращения: 09.11.2023).

нялся методом МКЭ. Предельным значением критерия соответствия моделей было принята разница собственных частот 5 %.

После проведения верификации модели выполнялась оценка напряженно-деформированного состояния трубопровода. Расчет напряжений выполнялся методом динамического анализа, где в качестве нагрузки были использованы значения виброперемещений точки максимального прогиба трубопровода, определенного для первой собственной форме колебаний участка трубопровода в вертикальной плоскости.

Кроме того, с использованием расчетного комплекса «Зенит-95» статическим методом были определены величина прогиба участка трубопровода, вызванная его весом, и соответствующие напряжения, вызванные весовыми нагрузками. Результаты расчета приведены в таблице 2, анализ данных показывает, что значения напряжений и прогибов, вызванных весовыми нагрузками, существенно превышают значения виброперемещений и вызываемых ими напряжений. Следовательно, максимальные значения виброперемещений не превысят 30 % от перемещений, вызванных весовыми нагрузками.

Таблица 2. Значения прогибов и напряжений [составлено авторами]

Table 2. Deflection and stress values [compiled by the authors]

№	Типо-размер $D_{нар} \times S_{ст}$, мм	Вибро-перемещение мм	Напряжение от вибрации, Мпа,	Прогиб от веса, мм	Напря- жение от веса, Мпа,
1	57х3,5	0,66	5,9	2,95	26,4
2	76х3,0	0,52	6,0	1,86	21,4
3	89х3,5	0,68	5,9	3,13	27,0
4	108х3,5	0,69	6,0	3,23	28,0

Для получения более полной картины вибрационного состояния трубопроводов в целом рассмотрим требования к вибростойкости специальной трубопроводной арматуры, установленные в НП-068-05⁷.

Согласно п. 2.3.22 НП-068-05 «Вновь разрабатываемая арматура и комплектующие устройства должны быть вибростойки в диапазоне частот от 5 до 100 Гц при действии вибрационных нагрузок по двум направлениям с ускорением до 0,1 g и с амплитудой колебаний до 50 мкм, причем одно из направлений воздействия совпадает с осью трубопровода». Таким образом, предельные значения вибрационных нагрузок на трубопроводную арматуру, установленные в НП-068-05 «Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования», могут быть превышены при предельных значениях параметров вибрации, установленных в ГОСТ Р 59115.11-2021, так как для низкочастотной вибрации уровень вибра-

ционных воздействий, согласно данных таблицы 2, может составить: виброускорение 0,3 g (0,1 g – НП-068-05), а виброперемещение 700 мкм (50 мкм – НП-068-05). Следовательно, при установке трубопроводной арматуры в трубопроводную систему, необходимо выполнять обязательную проверку прочности трубопровода в целом при воздействии вибрационных нагрузок.

Определение циклической прочности трубопроводов при воздействии вибрационных нагрузок проводилось в соответствии с ГОСТ Р 59115.9-2021⁸. Для принятых в рассмотрение 4-х вариантов расчетных схем были определены амплитуды условных упругих приведенных напряжений с учетом концентрации напряжений (σ_{aF}). Для определения коэффициентов концентрации с помощью расчетного комплекса «Зенит-95» были созданы расчетные модели тройниковых узлов, отражающие их реальные размеры. Максимальное значение (σ_{aF}) для рассмотренных четырех типоразмеров составило 13,4 Мпа. Принимая во внимание, что за 60 лет количество циклов колебаний с частотой 10 Гц составит $1,9 \cdot 10^{10}$ (в запас прочности принимается, что трубопровод работает без остановов) определим допускаемую амплитуду напряжений (σ_{aF}), получаемую для данного числа циклов. Для трубы, изготовленной из 12X18H10T, допускаемая амплитуда напряжений для расчетной температуры $t = 350^\circ\text{C}$ составит (σ_{aF}) = 46,4 Мпа.

Как видно из представленных выше результатов оценки циклической прочности участка трубопровода при нормируемом значении вибрационного воздействия $v_{max} = 15$ мм/с, повреждаемость трубопровода в узле приварки к оборудованию (коллектору) не превышает 25% за срок непрерывной эксплуатации 60 лет.

Выводы

Применение нормированного и не зависящего от частоты воздействия значение виброскорости $v_{max} = 15$ мм/с, установленного ГОСТ Р 59115.11-2021, для трубопроводов АС, спроектированных в соответствии с положениями нормативной документации, выдержки из которой приведены в Справочнике по трубопроводам тепловых электростанций [1], не отвечает современному уровню развития науки и техники и обладает излишним консервативным запасом.

Предлагается разработать и внести в нормативную документацию частотно-зависимые критерии предельных параметров вибрации для трубопроводов АС, уточненные в соответствии с реальными условиями работы данных трубопроводов.

⁷ 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: 09.11.2023)

⁸ ГОСТ Р 59115.9 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Повторный расчет на прочность. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2022. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200182238> (дата обращения: 09.11.2023)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Никитина И.К. Справочник по трубопроводам тепловых электростанций. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 176 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/yJRf0ObrMjXMo> (дата обращения: 11.11.2024).
Nikitina I.K. Handbook on pipelines of thermal power plants. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 176 p. (In Russ.) Available at: <https://djvu.online/file/yJRf0ObrMjXMo> (accessed: 11.11.2024).
2. Горюнов О.В., Словцов С.В. Расчетно-экспериментальное обоснование вибропрочности трубопроводов АЭС на основе квазистатического подхода. *Надежность и безопасность энергетики*. 2017;10(4):304–309. Режим доступа: <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-4-304-309> (дата обращения: 15.02.2024).
3. Кравец С.Б. Оценка сейсмостойкости технологических систем атомных станций. Диссертация доктора технических наук по специальности 05.04.11. Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного энергетического машиностроения. Москва, 2005. 254 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004271016> (дата обращения: 15.02.2024).
Kravets S.B. Assessment of seismic resistance of technological systems of nuclear power plants. Dissertation. Moscow, 2005. 254 p. (In Russ.). Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004271016> (accessed: 15.02.2024).
4. Slovtsov S.V., Soldatov A.S., Goriunov O.V., Sinilshchikov A.E., Leschenko A.Yu., Osipov Yu.V. Measurement of vibration parameters of SIS pipelines reactor based on RBMK-1000 at 1-st block Smolenskaya NPP. *Testing. Diagnostics*. 2017;8:44–50. <https://doi.org/10.14489/td.2017.08.pp.044-050>

ВКЛАД АВТОРОВ:

Кравец С.Б. – анализ результатов расчетов и разработка рекомендаций;
Кузин С.А. – проведение расчетов паропроводов;
Смолин А.Ю. – разработка рекомендаций.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сергей Борисович Кравец, доктор технических наук, профессор, начальник отдела надежности и качества, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Российская Федерация.

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

e-mail: kravets_sb@mail.ru

Сергей Алексеевич Кузин, ведущий конструктор, АО «Атоммашэкспорт»; кандидат технических наук, доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

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

e-mail: KuzinSergey55@mail.ru

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

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

e-mail: AYSmolin@mephi.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Kravets S.B. – analyzing the results of calculations and developing recommendations;
Kuzin S.A. – steam line calculations;
Smolin A.Yu. – developing recommendations.

FUNDING:

The study was carried out without external funding sources.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Sergey B. Kravets, Head of Reliability and Quality Department, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russian Federation.

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

e-mail: kravets_sb@mail.ru

Sergey A. Kuzin, leading designer, JSC Atommasheexport; Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

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

e-mail: KuzinSergey55@mail.ru

Aleksandr Yu. Smolin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

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

e-mail: AYSmolin@mephi.ru

Поступила в редакцию 04.12.2023

После доработки 15.02.2024

Принята к публикации 22.02.2024

Received 04.12.2023

Revision 15.02.2024

Accepted 22.02.2024