

РАСЧЕТНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТРЕБОВАНИЙ К МАТЕРИАЛАМ КОНСТРУКЦИЙ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ И МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В.Ю. Филин, Д.Р. Бараков, Е.Д. Назарова

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург,

Российская Федерация

E-mail: npk3@crism.ru

Аннотация. В обеспечении безопасной эксплуатации крупногабаритных конструкций Арктики ключевую роль играет применяемая система контроля качества судостроительных и трубных сталей, основанная на проведении специальных механических испытаний на трещиностойкость и хладостойкость. Требования к их результатам предложено количественно определять расчетами, поскольку существующие обоснования включают субъективные коэффициенты запаса. В статье описаны два типа разработанных расчетных процедур. Первым из них является численный вероятностный эксперимент, позволивший рассчитать требуемые параметры статической трещиностойкости металла сварных соединений при минимальной температуре эксплуатации в обеспечение первого уровня безопасности эксплуатации сварных конструкций – сопротивление старту трещины по хрупкому механизму. Процедура численного эксперимента включает многократную проверку вероятностного условия хрупкого разрушения элемента конструкции с дефектом в терминах нелинейной механики разрушения. Для этого разработаны предполагаемые распределения случайных параметров нагрузки, температуры и свойств стали, входящих в условие прочности, а также соответствующее программное обеспечение. Второй тип расчетных процедур предусматривает моделирование методом конечных элементов конкурирующего вязкого и хрупкого разрушения в элементах конструкций и в образцах различных типов, используемых для определения температур вязко-хрупкого перехода. Сравнение осуществляется для моделей, в которых задана одна и та же критическая величина коэффициента интенсивности напряжений, соответствующая продвижению хрупкого разрушения. Результатами расчета являются необходимые запасы по экспериментально определяемым температурам вязко-хрупкого перехода по отношению к минимальной температуре эксплуатации материала. Это позволяет обеспечить второй уровень безопасности эксплуатации конструкций – сопротивление материала распространению трещины. Разработаны принципы построения моделей и интерпретации результатов. Полученные требования к температурам вязко-хрупкого перехода сталей для новых морских проектов с высокими эксплуатационными требованиями не достигаются при применении обычных марок стали, о чем свидетельствуют накопленные в НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» результаты специальных механических испытаний. Поэтому выполненные расчеты обосновывают область обязательного применения стали арктических марок.

Ключевые слова: механика разрушения; хрупкое и вязкое разрушение; вязко-хрупкий переход; арктические конструкции; расчетные процедуры.

Расчетная процедура в обеспечении первого уровня безопасности

Трещины при эксплуатации обычно зарождаются в местах дефектов сварных соединений и конструктивных концентраторов напряжений. Сопротивление старту трещины контролируется испытаниями на статическую трещиностойкость с определением параметров CTOD (критического раскрытия вершины трещины) и J -интеграла на образцах полной толщины с краевым надразом и усталостной трещиной, располагаемой в различных зонах сварного соединения. Требования к параметрам CTOD и J к металлу сварного соединения определяются согласно стандарту организации [1], разработанному по результатам численного вероятностного эксперимента.

За расчетный дефект сварного соединения толщиной S принимают поверхностную полуэллиптическую трещину, ориентированную у границы усиления шва вдоль оси шва, с соотношением размеров $l/a = 3$. Глубину a принимают в зависимости от примененной процедуры и объема неразрушающего контроля при строительстве конструкции (как максимум, такой дефект не превышает размера валика сварного шва). При наличии конструкции протяженных сварных соединений глубину расчетного дефекта принимают в зависимости от их относительной длины:

$$a = -0,14 \times S^{0,5} \ln(1 - 0,95^{1/N}).$$

Используя величину J -интеграла, сформулируем условие предотвращения хрупкого разрушения в детерминистической постановке:

$$J_c \geq n \times J, \quad (1)$$

где J_c – среднее критическое значение J -интеграла по испытаниям при температуре T_D , n – коэффициент запаса, J – параметр нагрузки конструкционного элемента с расчетным дефектом. Расчетная процедура используется для определения коэффициента запаса в формуле (1). Поскольку рассматриваются эксплуатационные температуры в интервале вязко-хрупкого перехода, можно считать, что наступление разрушения по хрупкому механизму может произойти с некоторой вероятностью. То же условие прочности (1) в вероятностной постановке имеет вид

$$(J_c)_i \geq (J)_j, \quad (2)$$

где индексы i и j соответствуют случайным значениям трещиностойкости металла и параметра нагружения элемента конструкции с расчетным дефектом в конкретном случае нагружения.

Главная особенность процедуры – совместный учет нескольких независимых случайных параметров, задаваемых через генераторы псевдослучайных чисел (рандомайзеры) с периодом повторяемости не менее 10^7 . Данный период обеспечивается при количестве значащих цифр переменных не менее 8 в рекурсивных формулах вида $x_k = \{q \cdot x_k\}$, где q – простое число. В число параметров входят:

- случайная глубина дефекта $a_j = -\ln(x_1) \cdot a / \ln 20$, что соответствует вероятности того, что дефект глубиной более a будет обнаружен с вероятностью 95 %;

- распределение случайных относительных напряжений $\bar{\sigma}_j = \bar{\sigma} \cdot \left(1 - 0,5 \left[-\ln(x_2^\chi)\right]\right)$, где $\bar{\sigma}$ – детерминированная величина относительных напряжений. Показатель степени $\chi = 0,173$ выбран таким образом, чтобы обеспечить наступление наибольших нагрузок, составляющих не менее $0,95 \bar{\sigma}$, с периодичностью 5 000 случаев за срок службы 30 лет, или 167 раз в год, предполагая за каждый год 10^8 случаев нагружения. Доминирующее число случаев нагружения, таким образом, связано с небольшими нагрузками (работа оборудования, перепады давления и т. п.);

- температура, соответствующая случаям нагружения, задаваемая усеченным нормальным распределением (УНР), точка среза распределения – абсолютно минимальная климатическая температура в месте дислокации конструкции, T_{\min} . Случайное значение температуры эксплуатационного нагружения (до среза распределения) определяется по формуле

$$T_j = T_0 + \sqrt{-2 \ln(x_3)} \times \cos(4\pi \cdot x_4) \cdot \sigma_{(T)},$$

где x_3 и x_4 – псевдонезависимые случайные величины в диапазоне (0, 1), $\sigma_{(T)}$ – среднеквадратическое отклонение, °C;

- трещиностойкость материала, которую считают удовлетворяющей трехпараметрическому распределению Вейбулла, где β – параметр формы распределения, связанный с коэффициентом вариации V ; J_{c0} – медианное значение (параметр масштаба), J_{\min} – минимальное значение:

$$(J_c)_i|_{T_D} = J_{\min} + (J_{c0} - J_{\min})[-\ln(x_5)]^{1/\beta},$$

что следует откорректировать для температуры, соответствующей случаю нагружения:

$$(J_c)_i|_{T_j} = (J_c)_i|_{T_D} \exp(0,04(T_j - T_D)).$$

Задают приемлемую вероятность разрушения Q , а также начальное значение J_{c0} . Количество опытов в численном эксперименте для проверки условия (2) принято равным 2×10^6 , что доста-

точно по результатам проверки зависимости результатов от числа опытов. Вычисляется количество случаев «разрушения», то есть невыполнения условия (2). По результатам расчёта методом пошагового спуска подбирают новое значение J_{c0} , которое обеспечивает получение задаваемого значения вероятности Q с допуском 5 %. В результате вычисляют частный коэффициент запаса $n_1 = J_c / J_{\min}$. Чтобы получить искомый коэффициент запаса n в формуле (1), необходим дополнительный сомножитель n_A , учитывающий ограниченность числа корректных результатов испытаний в серии m , то есть возможное отличие J_c от их среднего арифметического значения. Последний, исходя из отдельного численного эксперимента, для случая трёх корректных результатов в серии образцов принимают равным

$$n_A = 0,6 + (9V^3 - 3,4V^2 + V)(0,00031S^2 - 0,05S + 6,5).$$

Окончательно определяют требования к минимальным средним значениям J_c и СТОД. Для выполнения расчётов разработано специальное программное обеспечение. На основании выполненных численных экспериментов предложена формула для коэффициента запаса n в случае, когда максимальная эксплуатационная нагрузка составляет $\bar{\sigma} = 0,7\sigma_T$, где σ_T – предел текучести стали:

$$n = (1,4 - 6,9V + 30V^2) \times (1 - (m-3)/7 \times \sqrt{V}), \quad n \geq 1, \quad V \geq 0,10.$$

Расчетная процедура в обеспечении второго уровня безопасности. Моделирование распространения трещины при конкурирующем вязком и хрупком разрушении

Если трещина в конструкции стартовала, она должна быть остановлена основным металлом. Способность остановить трещину выражается температурой торможения трещины (T_{xp}) или критическим значением коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_{Ia} при этой температуре. Температуру T_{xp} затруднительно найти прямыми испытаниями, поэтому находят температуры вязко-хрупкого перехода основного металла NDT, T_{KB} , T_{DWT} . Цель расчетных процедур – обоснование корреляций T_{xp} с перечисленными температурами. Их использование позволяет получить оценки T_{xp} по каждому виду испытаний. За T_D – минимальную температуру применимости материала – принимают наиболее высокую («теплую») из этих оценок [2].

Температура нулевой пластичности NDT – максимальная температура, при которой происходит разрушение образцов с хрупкой надрезанной наплавкой при ударе падающим грузом. Температура T_{KB} при испытаниях на статический трехточечный изгиб образцов натурной толщины с круглым (ключевым) надрезом соответствует средней доле волокнистой составляющей в изломах 70 %. Температура T_{DWT} при испытаниях на трехточечный изгиб падающим грузом образцов с острым надрезом соответствует доле волокнистой составляющей в изломах 70...85 % [2].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» предложена численная модель [3], не связанная с расчетами методами конечных элементов (МКЭ), позволяющая оценить величину K_{Ia} , необходимую для торможения распространяющейся по хрупкому механизму трещины в элементе конструкции толщиной S [мм]. Такая оценка составляет

$$K_{Ia}|_{T_{xp}} = \sqrt{3,5 \times 10^{-5} \sigma_{m3}^{2,42} \cdot S}, \quad (3)$$

где T_{xp} – температура торможения трещины, σ_{m3} – эффективный предел текучести материала при данной температуре, который, в частности, учитывает упрочнение вследствие повышения скорости деформирования. Требуемая величина K_{Ia} судовостроительных сталей, определенная по этой формуле, как правило, не превышает $100 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$, поэтому допустимо использование линейной механики разрушения. Оценка требований к температурам вязко-хрупкого перехода, определяемым каждым из применяемых методов, осуществляется с использованием следующей процедуры:

- определяется «истинная» диаграмма нагружения материала с пределом текучести σ_T [3, 4];
- с помощью выполнения серий расчетов МКЭ процесса нагружения испытательного образца определяется сеточно зависящая величина жесткости напряженного состояния χ , (то есть достигаемая в какой-либо точке фронта трещины и используемая в качестве условия хрупкого разрушения [4–6])

$$\chi = \sigma_1 / \sigma_i,$$

где σ_1 – первые главные напряжения, σ_i – интенсивность напряжений;

- подбирается χ , соответствующее достижению соответствующей температуры вязко-хрупкого перехода;
- решается калибровочная задача МКЭ, где в условиях плоской деформации и маломасштабной текучести в модели с тем же размером конечного элемента, нагружаемой растяжением (Y -функция равна единице), создается такая же величина χ и определяется соответствующее критическое значение КИН материала $K_{Ia}|_{T_m} = \sigma\sqrt{\pi a}$, где T_m – температура испытания. Данная процедура необходима, так как прямое определение КИН для модели образца невозможно, а пересчет через изменение потенциальной энергии (J -интеграл) дает слишком низкие «средние» значения;
- поскольку рассматриваются температуры в интервале вязко-хрупкого перехода, используется ожидаемая температурная зависимость КИН в виде

$$K_{Ia}|_{T_D} = K_{Ia}|_{T_m} \cdot \exp[0,02(T_D - T_m)] \quad (4)$$

Формула (4) практически эквивалентна температурной зависимости нижней огибающей K_{Ia} в коде BPVC [7]. Из нее определяется требуемый температурный запас ($T_D - T_m$) с учетом (3).

Для каждого из видов испытаний проводится поэтапное решение упругопластической задачи МКЭ при возрастающем перемещении точек приложения нагрузки вплоть до выполнения какого-либо из принятых локальных условий разрушения. Затем при фиксированных перемещениях выполняется поэтапное снятие запрета на перемещение узлов «разрушенных» элементов относительно плоскости симметрии образца вплоть до прекращения продвижения трещины. После этого нагружение возобновляется. Используются несколько конкурирующих условий разрушения:

- хрупкое разрушение по достижении критического значения жёсткости напряжённого состояния χ ;
- вязкий отрыв по достижению одного из локальных критериев: критической деформации либо нормализованного по величине интенсивности пластической деформации критерия Кокрофта–Лэтэма–Оха [3],
- вязкий срез по достижении критического значения максимальной касательной деформации $\gamma_c = (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$ [5].

К настоящему моменту получены следующие корреляции:

для испытаний по методике NDT:

$$T_{xp} - NDT = 50 \ln \left(0,084 \sqrt{S} \cdot (\sigma_m)_{T_D}^{1,21} / (\sigma_m)_{NDT} \right),$$

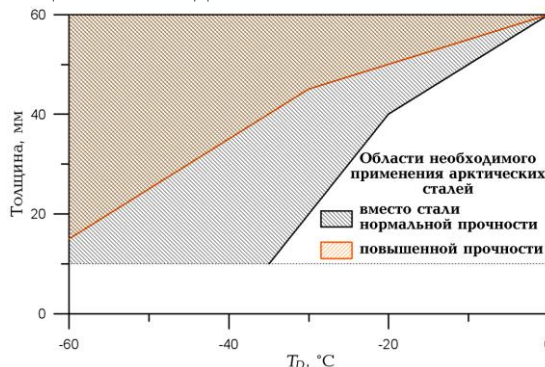
для испытаний по методике T_{KB} :

$$T_{xp} - T_{KB} = 50 \ln \left(1,55 \frac{\sqrt{S}}{S+14} \cdot (\sigma_m)_{T_D}^{1,21} / (\sigma_m)_{T_{KB}} \right),$$

для испытаний по методике DWTT:

$$T_{DWTT} = T_{xp} - (0 \dots 10)^\circ\text{C}.$$

Все представленные оценки сделаны для изотропного металла. Оценки для металла после термомеханической обработки, склонного к расщеплениям, отличаются, для исследования влияния расщеплений создана специальная модель МКЭ.



Минимальная температура применимости стали «обычных» марок и области необходимого применения сталей с индексом «Агс» для морских конструкций

О необходимости применения сталей арктических марок

Применение рассмотренных расчетных процедур позволяет оценить минимальные температуры применимости «обычных» марок стали (см. рис.), описанных в Правилах Российского морского регистра судоходства [2]. Оказывается, что эти границы не охватывают соотношения толщин и температур эксплуатации, требуемые для современных арктических проектов. Поэтому предложено внести в [2] требования к применению арктических марок стали (с индексом «Arc») для изготовления наиболее ответственных конструкций – судовых связей категории III и специальных конструкционных элементов морских платформ.

Выводы

Обоснование требований, предъявляемых к судостроительным и трубным сталям, требует применения разнообразных расчетных процедур, связанных как с численными вероятностными экспериментами, так и с моделированием МКЭ процесса распространения трещины при конкурирующем вязком и хрупком разрушении. Разработаны расчетные процедуры, применимые как на стадии аттестации новых материалов, так и для оценки допустимой дефектности.

Для новых морских проектов с высокими эксплуатационными требованиями обоснована необходимость использования сталей с индексом «Arc». Расчетные соотношения критических температур подтверждены экспериментально.

Литература

1. СТО-07516250-3613-2024 Расчётная оценка прочности по критерию предотвращения разрушения от дефектов в конструкции. Методы расчета.
2. Правила классификации и постройки морских судов. НД № 2-020101-174.
3. Количественные оценки сопротивления распространению разрушения судостроительных и трубных сталей / В.Ю. Филин, А.В. Ильин, А.В. Ларионов и др. // VIII Всероссийская конференция «Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем: материалы и доклады», Красноярск, 16–20 сентября 2023 г. – Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2023. – С. 83–88.
4. Получение истинной диаграммы нагружения на основе испытаний на растяжение с использованием численных методов / Е.Д. Назарова, М.М. Пегливанова, В.Ю. Филин, А.В. Ларионов // Неделя науки ФизМех: сборник материалов Всероссийской научной конференции, 3–7 апреля 2023 г. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – С. 29–32.
5. Ильин, А.В. Моделирование МКЭ распространения и торможения хрупкого разрушения в пластинах с исходной трещиной / А.В. Ильин, Д.М. Артемьев, В.Ю. Филин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Том 84, № 1(I). – С. 56–65.
6. Филин, В.Ю. Определение критических температур хрупкости стали на базе численного моделирования испытаний образцов Шарпи / В.Ю. Филин, А.В. Мизецкий, Е.Д. Назарова // Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов: материалы XIV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат», г. Москва, 25 марта 2022 г. – М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. – С. 320–332.
7. ASME BPVC Section XI. Division 1. Rules for Inspection and Testing of Components of Light-Water Cooled Plants. Article A-4000: Material properties. – 2021.

Поступила в редакцию 22 сентября 2025 г.

Сведения об авторах

Филин Владимир Юрьевич – доктор технических наук, начальник сектора аттестации материалов и обеспечения прочности конструкций, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: npk3@crism.ru.

Бараков Данила Ростиславович – аспирант, инженер 3-й категории сектора аттестации материалов и обеспечения прочности конструкций, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: npk3@crism.ru.

Назарова Елизавета Дмитриевна – аспирант, инженер 2-й категории сектора аттестации материалов и обеспечения прочности конструкций, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: npk3@crism.ru.

CALCULATION PROCEDURES USED FOR THE SUBSTANTIATION OF THE SYSTEM OF REQUIREMENTS FOR HULL MATERIALS OF MARINE STRUCTURES AND ARTERIAL PIPELINES

V.Yu. Filin, D.R. Barakov, E.D. Nazarova

NRC Kurchatov Institute – CRISM Prometey, Saint-Petersburg, Russian Federation

E-mail: npk3@crism.ru

Abstract. Safe operation of large-size Arctic structures is ensured when the key role is played by the due quality control system applied for shipbuilding and pipeline steels, that is based on special mechanical tests for fracture toughness and cold resistance. The way suggested to substantiate the required test results is calculation allowing to get quantitative estimates while the actual substantiations include subjective reserve factors. Two types of developed calculation procedures are presented in the paper. The first is a probability numeric experiment assessing the required static fracture toughness of the metal of welded joints at the minimum service temperature ordered to ensure the first level of safe operation of welded structures related to brittle crack start resistance. The developed numerical procedure includes a multiple check of the probabilistic fracture condition of a flaw-containing structural element in terms of elastic-plastic fracture mechanics. Supposed distributions of relevant load parameters, temperature and steel performances are developed as well as the corresponding software. The second type of calculation procedures provides for FEM simulations of concurring ductile and brittle fracture in structural elements and specimens of different configurations used in experiments to evaluate various ductile to brittle transition temperatures. The comparison is performed for models where the material has the same critical value of stress intensity factor corresponding to brittle fracture propagation. This ensures the second level of safe operation of structures, namely the resistance to fracture propagation. The principles of FEM simulation and calculation results interpretation are developed. The calculated requirements for ductile to brittle transition temperatures of steels for prospective marine projects with high service parameters cannot be attained with common steel grades, it is proved by the test results collected in NRC Kurchatov Institute – CRISM Prometey. So the calculations undertaken substantiate the area of obligatory application of Arctic steel grades.

Keywords: *fracture mechanics; brittle and ductile fracture; ductile to brittle transition; Arctic structures; calculation procedures.*

References

1. STO-07516250-3613-2024 *Raschyetnaya otsenka prochnosti po kriteriyu predotvrashcheniya razrusheniya ot defektov v konstruktsii. Metody rascheta.* (The Calculated Strength Assessment is based on the Criterion of Preventing Destruction from Structural Defects. Calculation Methods.)
2. *Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov.* ND № 2-020101-174 (Rules for the classification and construction of naval vessels. ND No. 2-020101-174.).
3. Filin V.Yu., Il'in A.V., Larionov A.V., Mizetskiy A.V., Nazarova E.D., Peglivanova M.M. *Kolichestvennye otsenki soprotivleniya rasprostraneniya razrusheniya sudostroitel'nykh i trubnykh staley* (Quantitative Estimates of the Resistance to the Spread of Destruction of Shipbuilding and Pipe Steels). *Bezopasnost' i monitoring prirodnnykh i tekhnogennnykh sistem: materialy i doklady. VIII Vserossiyskaya konferentsiya, Krasnoyarsk, 16–20 sentyabrya 2023 g.* (Proc. VIII All-Russian Conference "Safety and Monitoring of Natural and Man-made Systems: materials and reports", Krasnoyarsk, September 16–20, 2023, Novosibirsk, FITs IVT Publ., 2023, pp. 83–88. (in Russ.).
4. Nazarova E.D., Peglivanova M.M., Filin V.Yu., Larionov A.V. *Poluchenie istinnoy diagrammy nagruzheniya na osnove ispytaniy na rastyazhenie s ispol'zovaniem chislennykh metodov* (Obtaining a True Loading Diagram Based on Tensile Tests using Numerical Methods). *Nedelya nauki FizMekh:*

sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii, 3–7 aprelya 2023 g (Proc. All-Russian Scientific Conference “Week of Science of Physics FizMech”, April 3–7, 2023), St. Petersburg: Politekh-Press Publ., 2023, pp. 29–32. (in Russ.).

5. Ilyin A.B., Artemiev D.M., Filin V.Yu. Simulation of the Propagation And Arrest of the Brittle Fracture in Steel Plates of Different Thicknesses with Initial Crack Using Finite Element Method. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2018, Vol. 84, no. 1(I), pp. 56–65. (in Russ.).

6. Filin V.Yu., Mizetskiy A.V., Nazarova E.D. Opredelenie kriticheskikh temperatur khrupkosti stali na baze chislennogo modelirovaniya ispytaniy obraztsov Sharpi (Determination of Critical Steel Brittleness Temperatures based on Numerical Simulation of Tests of Sharpie Samples). *Proc. XIV All-Russian Conference on testing and research of material properties “TestMat” “Physico-Mechanical Tests, Strength and Reliability of Modern Structural and Functional Materials”*, Moscow, March 25, 2022, Moscow, NITs “Kurchatovskiy institut”–VIAM Publ., 2022, pp. 320–332. (in Russ.).

7. ASME BPVC Section XI. Division 1. *Rules for Inspection and Testing of Components of Light-Water Cooled Plants. Article A-4000: Material properties*, 2021.

Received September 22, 2025

Information about the authors

Filin Vladimir Yurievich is a Dr. Sc. (Engineering), Head of Group in Certification of Materials and Structural Strength, NRC Kurchatov Institute – CRISM Prometey, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: npk3@crism.ru.

Barakov Danila Rostislavovich is Post-graduate Student, Engineer in the Group in Certification of Materials and Structural Strength, NRC Kurchatov Institute – CRISM Prometey, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: npk3@crism.ru.

Nazarova Elizaveta Dmitrievna is Post-graduate Student, Engineer in the Group in Certification of Materials and Structural Strength, NRC Kurchatov Institute – CRISM Prometey, Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: npk3@crism.ru.