https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3(46)-00-00 EDN: PZRQHD
УДК 699.941; 624.07; 699.81699.81

К ВОПРОСУ О НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Р.В. ЮРЬЕВ, канд. техн. наук
Д.В. ИВАНОВ
Ю.М. ГРОШЕВ✉, канд. техн. наук
АО «Атомэнергопроект», Бакунинская ул., д. 7, стр. 1, г. Москва, 107996, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В статье рассмотрены вопросы классификации и обеспечения надежности строительных конструкций атомных станций; выполнена оценка надежности элементов железобетонных конструкций реакторного здания, которые относятся к системе противопожарной защиты и препятствуют распространению опасных факторов пожаров; показано, что такие конструкции обладают высокой надежностью по отношению к нагрузкам нормальной эксплуатации, потому их отказы могут не рассматриваться в анализах надежности систем безопасности и анализах безопасности атомных станций.

Цель. Показать, что требования норм проектирования зданий и сооружений атомных станций обеспечивают высокий уровень надежности их строительных конструкций, а потому меры по защите элементов этих конструкций от отказа по общим причинам не требуются.

Материалы и методы. Оценка надежности элементов железобетонных конструкций реакторного здания выполнена согласно рекомендациям РБ 100-15 с использованием метода двух моментов.

Результаты. По результатам выполненной оценки надежности элементов железобетонных строительных конструкций реакторного здания показано, что вероятность их отказа не превышает 10^{-6}, и согласно требованиям п. 1.2.12 и п. 1.2.15 НП 001-15 допускается не учитывать эти отказы в качестве дополнительного независимого отказа или исходного события при анализе проектных аварий. Отмечено, что меры по обеспечению огнестойкости железобетонных конструкций при пожарах направлены на защиту арматуры от превышения температуры, при которой может произойти изменение ее деформационно-прочностных свойств, что может привести к потере несущей способности железобетонных элементов. Таким образом, при сохранении свойств арматуры сохраняется уровень надежности железобетонных элементов, что позволяет не учитывать отказы строительных конструкций в анализах надежности систем противопожарной защиты.

Выводы. Высокой уровень надежности строительных конструкций реакторного здания, обеспечиваемый выполнением требований норм проектирования и Федерального закона № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», позволяет не учитывать их отказы в анализах надёжности систем и анализах безопасности.

Ключевые слова: отказ строительных конструкций, надежность, железобетонные элементы, отказ по общей причине, вероятность отказа, огнестойкость, атомные станции

Для цитирования: Юрьев Р.В., Иванов Д.В., Грошев Ю.М. К вопросу о надежности строительных конструкций атомных станций. *Вестник НИЦ «Строительство».* 2025;46(3):XX–XX. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3(46)-XX-XX

Вклад авторов
Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование
Исследование выполнялось за счет средств АО «Атомэнергопроект».

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.06.2025
Поступила после рецензирования 10.08.2025
Принята к публикации 14.08.2025

ON THE RELIABILITY OF CONSTRUCTION STRUCTURES AT NUCLEAR POWER PLANTS

R.V. YURYEV, Cand. Sci. (Engineering)
D.V. IVANOV
Yu.M. GROSHEV✉, Cand. Sci. (Engineering)
JSC Atomenergoproekt, Bakuninskaya str., 7, bld. 1, Moscow, 107996, Russian Federation

Abstract

Introduction. This paper covers the classification and reliability of construction structures at nuclear power plants; the reliability of reinforced concrete elements of fire protection systems that prevent the spread of hazardous fire factors is assessed. Such structures were shown to be highly reliable in terms of normal operating loads, so their failures may not be considered in reliability analyses of safety systems and safety analyses of nuclear power plants.

Aim. To demonstrate that the design requirements for nuclear power plant buildings and structures ensure a high level of reliability for their structural components, and therefore measures to protect these components from failure due to common causes are not required.

Materials and methods. The reliability assessment of reinforced concrete structural elements in buildings and structures at nuclear power plants was performed in accordance with the recommendations of RB 100-15 using the two-moment method.

Results. According to the study results and as required by clauses 1.2.12 and 1.2.15 of NP 001-15, elements of reinforced concrete building structures with a failure probability typically exceeding 10^{-3} may not be considered as an additional independent failure or initiating event in the analysis of design basis accidents. It is noted that measures to ensure the fire resistance of reinforced concrete structures in fires are aimed at protecting the reinforcement from exceeding the temperature at which its deformation and strength properties may change, which can lead to a loss of load-bearing capacity of reinforced concrete elements. Thus, while maintaining the properties of reinforcement, the reliability level of reinforced concrete elements is preserved, thus enabling structural failures to be disregarded in reliability analyses of fire protection systems.

Conclusions. The high level of reliability of nuclear power plant structures, ensured by compliance with design standards, provides a basis for not considering their failures in system reliability and safety analyses.

Keywords: failure of building structures, reliability, reinforced concrete elements, failure due to a common cause, probability of failure, fire resistance, nuclear power plants

For citation: Yuryev R.V., Ivanov D.V., Groshev Yu.M. On the reliability of construction structures at nuclear power plants. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction.* 2025;46(3):XX–XX. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3(46)-XX-XX

Authors contribution statement
All the authors have made an equal contribution to the preparation of the publication.

Funding
The study was funded by JSC Atomenergoproekt.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Received 29.06.2025
Revised 10.08.2025
Accepted 14.08.2025

Особенностью проектирования зданий и сооружений атомных станций является необходимость обеспечения условий для функционирования размещенных в них систем и элементов, важных для безопасности при режимах нормальной эксплуатации, а также при событиях с нарушениями нормальной эксплуатации, включая проектные и запроектные аварии.

Несущие элементы строительных конструкций зданий и сооружений, в которых размещены системы, важные для безопасности, должны сохранять прочность и устойчивость при воздействии всех предусмотренных в проекте сочетаний нагрузок, возникающих как при нормальном функционировании этих систем (от веса оборудования, технологических сред, вибрации и т. п.), так и при различных внутренних (пожары, затопления, взрывы, летящие предметы и др.) и внешних (сейсмические воздействия, воздушная ударная волна, падение самолета и др.) воздействиях.

Таким образом, согласно классификации по НП 001-15 [1], такие строительные конструкции являются пассивными элементами, важными для безопасности, которым назначается соответствующий класс безопасности и предъявляются требования к обеспечению их высокой надежности.

Анализ надежности пассивных элементов систем, важных для безопасности, выполняется согласно РБ 100-15 [2].

В приложении к задачам расчета на прочность условие отказа строительных конструкций математически будет выражаться неравенством:

$$g = R - Q < 0,$$

где g – функция работоспособности или резерв прочности;

R – несущая способность, выраженная в тех же единицах, что и нагрузочный эффект Q;

Q – нагрузочный эффект.

При любых законах распределения R и Q математическое ожидание и стандартное отклонение резерва прочности соответственно равны:

$$m_g = m_R - m_Q,$$

$$S_g^2 = S_R^2 + S_Q^2,$$

где m_R и S_R – математическое ожидание и стандарт распределения несущей способности;

m_Q и S_Q – математическое ожидание и стандарт распределения нагрузочного эффекта.

Для нормального распределения случайных величин вероятность отказа P_f определяется по формуле:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta),$$

где $\Phi(\beta)$ – табулированный интеграл Гаусса;

$\beta = \dfrac{m_g}{S_g}$ – характеристика безопасности.

Выражение для определения характеристики безопасности можно записать в виде:

$$\beta = \frac{n-1}{\sqrt{n^2 \times \upsilon_R^2 + \upsilon_Q^2}},$$

где $n = m_R/m_Q$ – коэффициент безопасности;

ν_R – коэффициент вариации несущей способности;

ν_Q – коэффициент вариации нагрузочного эффекта.

Проектирование строительных конструкций зданий и сооружений АЭС осуществляется в соответствии требованиями и критериями российских нормативных документов, в основе которых лежит метод расчета по предельным состояниям. Изменчивость свойств материалов, нагрузок и условий работы учитывается с помощью ряда коэффициентов надежности.

Изменчивость свойств материала конструкции учитывается с помощью коэффициента надежности по материалу γ_m. Согласно СП 63.13330.2012 [3] расчетные значения параметров прочности материала определяются делением их нормативных значений на коэффициент γ_m, соответствующий рассматриваемому предельному состоянию.

Значения γ_m для прочности бетона и арматуры составляют:

– 1,3 – для бетона при сжатии;

– 1,5 – для бетона при растяжении;

– 1,15 – для арматуры при растяжении.

Нормативные значения параметров прочности материалов, приведенные в СП 63.13330.2012 [3], определены на основе нормального закона распределения с доверительной вероятностью превышения не менее 95 %.

Нормированное значение коэффициента вариации прочности бетона при сжатии, которое является среднестатистическим для множества заводов по производству бетона, составляет 0,135 [4].

Согласно ГОСТ Р 52544-2006 «Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций. Технические условия» [5], значение коэффициента вариации прочности арматуры при растяжении составляет 0,08 для предела текучести, 0,07 – для временного сопротивления.

Для нормального закона распределения значение математического ожидания параметра прочности m_R может быть выражено через расчетные значения параметров прочности $R^{расчетное}$ по формулам:

$$R^{нормативное} = m_R - 1{,}645 \times S_R;$$

$$R^{нормативное} = R^{расчетное} \times \gamma_m;$$

$$S_R = m_R \times v_R;$$

$m_R = \dfrac{R^{расчетное} \times 1{,}3}{1 - 1{,}645 \times 0{,}135} = R^{расчетное} \times 1{,}67$ – для бетона при сжатии;

$m_R = \dfrac{R^{расчетное} \times 1{,}15}{1 - 1{,}645 \times 0{,}08} = R^{расчетное} \times 1{,}32$ – для арматуры при растяжении.

Для учета изменчивости нагрузок на строительные конструкции используются коэффициенты надежности по нагрузке γ_f. Согласно СП 20.13330.2016 [6], расчетные значения параметров нагрузки определяются умножением их нормативных значений на коэффициент γ_f, соответствующий рассматриваемому предельному состоянию.

Коэффициенты надежности по нагрузке γ_f для веса строительных конструкций составляют:

– металлические конструкции – 1,05;

– бетонные конструкции (со средней плотностью выше 1600 кг/м^3) – 1,1.

Коэффициенты надежности по нагрузке γ_f для веса оборудования и материалов составляют:

– стационарное оборудование – 1,05;

– изоляция стационарного оборудования – 1,2;

– заполнители оборудования – жидкости – 1,0.

Коэффициенты надежности по нагрузке γ_f для равномерно распределенных кратковременных нагрузок составляют:

– 1,3 – при нормативном значении менее 2,0 кПа;

– 1,2 – при нормативном значении 2,0 кПа и более.

Поскольку наибольшие усилия в несущих строительных конструкциях реакторного здания при нормальной эксплуатации возникают от действия постоянных нагрузок от веса строительных конструкций и оборудования, то для оценки математического ожидания нагрузочного эффекта Q консервативно можно принять минимальный коэффициент надежности по нагрузке 1,1.

Предполагая, что эти нагрузки изменяются согласно нормальному закону распределения, а их нормативное значение соответствует вероятности непревышения 0,95, а расчетное значение – 0,99865, получим следующие параметры распределения нагрузочного эффекта Q:

$$Q^{нормативное} = m_Q + 1{,}645 \times S_Q;$$

$$Q^{расчетное} = m_Q + 3 \times S_Q;$$

$$Q^{расчетное} = Q^{нормативное} \times \gamma_f;$$

$$S_Q = m_Q \times \nu_Q;$$

$$\nu_Q = \frac{\gamma_f - 1}{3 - 1{,}645 \times \gamma_f} = \frac{1{,}1 - 1}{3 - 1{,}645 \times 1{,}1} = 0{,}084;$$

$$m_Q = \frac{Q^{расчетное}}{1 + 3\nu_Q} = 0{,}8 Q^{расчетное}.$$

В соответствии с Федеральным законом № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [7] для зданий и сооружений повышенного уровня ответственности принимается значение коэффициента надежности по ответственности не менее 1,1. В прочностных расчетах на коэффициент надежности по ответственности умножается нагрузочный

эффект (внутренние усилия и перемещения конструкции и основания, вызываемые нагрузками и воздействиями) или на него делится несущая способность.

Если расчетное значение нагрузок определяется с учетом коэффициента надежности по ответственности, то:

$$m_Q = 0,8\frac{Q^{расчетное}}{1,1} = 0,726Q^{расчетное}.$$

При проектировании элементов несущих железобетонных конструкций площадь арматуры подбирается из условия обеспечения непревышения расчетных усилий в арматуре ее расчетной несущей способности при растяжении:

$$Q^{расчетное} \leq R^{расчетное}.$$

Тогда коэффициент безопасности для арматуры при растяжении будет равен:

$$n = m_R/m_Q \geq 1,32 / 0,726 = 1,82.$$

На рис. 1 приведен график зависимости вероятности отказа элемента от коэффициента безопасности.

Для минимального значения $n = 1,82$, которое обеспечивается нормами проектирования железобетонных конструкций зданий и сооружений АЭС, вероятность отказа элемента составит $P_f = 4,96\times10^{-7}$.

Назначение пределов огнестойкости для железобетонных элементов и устройство защитного слоя бетона необходимой толщины и (или) других мер противопожарной защиты строительных конструкций позволяют защитить арматуру от температурного воздействия возможного пожара, при котором может произойти изменение ее деформационно-прочностных

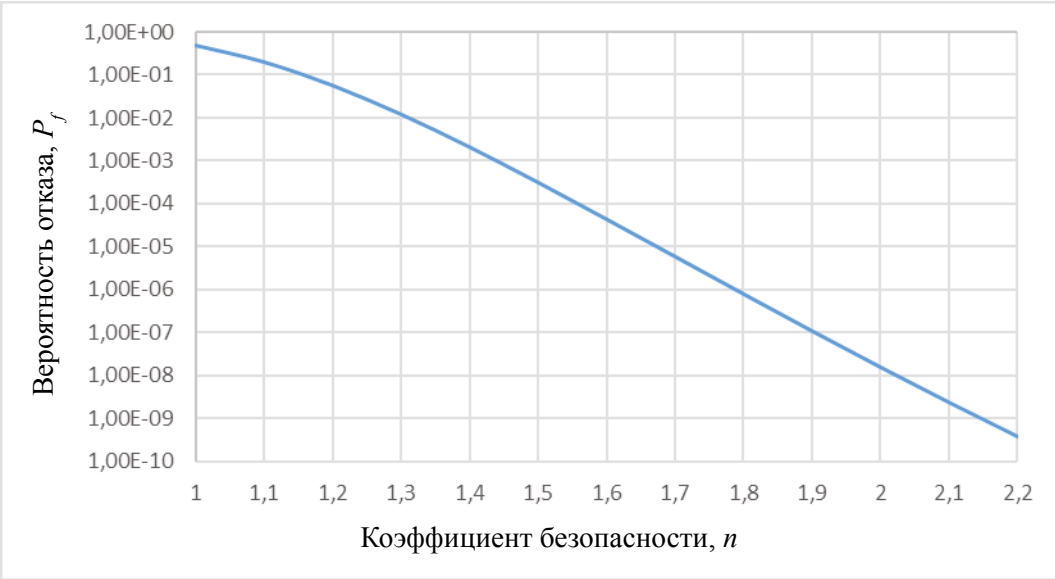

Рис. 1. График зависимости вероятности отказа железобетонных элементов строительных конструкций
Fig. 1. Dependence of the failure probability of reinforced concrete elements in construction structures

свойств и потеря несущей способности железобетонных элементов. При сохранении первоначальных свойств арматуры сохранится и уровень надежности железобетонных элементов.

В случае если пожар в пожарном отсеке приводит к нарушению пределов и условий безопасной эксплуатации с отказом каналов системы безопасности, то должны остаться два неповрежденных пожаром канала этой системы или один канал с внутренним резервированием активных элементов. В этом случае выполнение функций безопасности системой, подвергшейся воздействию пожара, может быть гарантированно с учетом независимого отказа любого элемента этой системы.

Как видно из результатов выполненной оценки надежности, за счет регламентированного учета при проектировании зданий АЭС коэффициента надежности по ответственности не менее 1,1 элементы железобетонных конструкций реакторного здания обладают высокой надежностью по отношению к нагрузкам нормальной эксплуатации. Уровень их надежности (вероятность отказа $P_f < 10^{-6}$) при условиях нормальной эксплуатации позволяет не рассматривать строительные конструкции в анализах надежности технологических систем, важных для безопасности, для которых вероятность отказа, как правило, лежит в интервале от 10^{-3} до 10^{-2}, и не учитывать в качестве исходных событий проектных аварий.

Также при возникновении исходных событий, включая пожар, отказы строительных конструкций могут не рассматриваться как единичный отказ, поскольку, согласно п. 1.2.12 НП 001-15 [1], единичный отказ пассивного элемента без движущихся частей с вероятностью невыполнения функций безопасности менее 10^{-3} может не рассматриваться.

Так как целью мер по защите от отказов по общей причине в соответствии с определениями принципов резервирования, независимости и разнообразия, согласно НП 001-15 [1], является повышение их надежности, то ввиду высокой надежности строительных конструкций реакторного здания дополнительных мер по защите их элементов от отказа по общим причинам не требуется.

Список литературы

1. НП 001-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций [интернет]. Москва; 2016. Режим доступа: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293756/4293756900.pdf.

2. РБ 100-15. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по порядку выполнения анализа надежности систем и элементов атомных станций, важных для безопасности, и их функций [интернет]. Москва; 2015. https://ohranatruda.ru/upload/iblock/ea5/4293766033.pdf.

3. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменением № 1). Москва: Минстрой России; 2015.

4. *Лычев А.С.* Надежность строительных конструкций. Москва: Издательство АСВ, 2008.

5. ГОСТ Р 52544-2006. Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2006.

6. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. Москва: Стандартинформ; 2018.

7. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений. Федеральный закон 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ [интернет]. Режим доступа: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=475858.

References

1. NP 001-15. Federal norms and rules in the field of atomic energy use "General provisions for ensuring the safety of nuclear power plants [internet]. Moscow; 2016. Available at: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293756/4293756900.pdf. (In Russian).
2. RB 100-15. Safety Guide for the Use of Atomic Energy "Recommendations on the Procedure for Performing Reliability Analysis of Systems and Elements of Nuclear Power Plants Important to Safety and Their Functions. [internet]. Moscow; 2015. Available at: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/ea5/4293766033.pdf. (In Russian).
3. SP 63.13330.2012. Concrete and won concrete construction. Design requirements. Updated version of SNiP 52-01-2003 (with Amendment No. 1). Moscow: The Ministry of Construction of Russia; 2015. (In Russian).
4. *Lychev A.S.* Reliability of building structures. Moscow: ASV Publ., 2008. (In Russian).
5. State Standard R 52544-2006. Weldable deformed reinforcing rolled products of A500C and B500C classes for reinforcement of concrete constructions. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2006. (In Russian).
6. SP 20.13330.2016. Loads and actions. Updated version of SNiP 2.01.07-85*. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
7. Federal Law of December 30, 2009 No. 384 "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures" [internet]. Available at: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=475858. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Роман Васильевич Юрьев, канд. техн. наук, заместитель директора по обоснованию безопасности-начальник управления, АО «Атомэнергопроект», Москва
e-mail: yurev_rv@aep.ru
Roman V. Yuryev, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Director for Safety Justification, Head of Department, JSC Atomenergoproekt, Moscow
e-mail: yurev_rv@aep.ru

Дмитрий Валентинович Иванов, главный инженер, АО «Атомэнергопроект», Москва
e-mail: ivanov_dv@aep.ru
Dmitriy V. Ivanov, Chief Engineer, JSC Atomenergoproekt, Moscow
e-mail: ivanov_dv@aep.ru

Юрий Михайлович Грошев✉**,** канд. техн. наук, главный специалист, АО «Атомэнергопроект», Москва
e-mail: Groshev_YM@aep.ru
Yuriy M. Groshev✉**,** Cand. Sci. (Engineering), Lead Specialist, JSC Atomenergoproekt, Moscow
e-mail: Groshev_YM@aep.ru

✉Автор, ответственный за переписку / Corresponding author