



СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ

ISSN 2618-9283

DOI 10.37153/2618-9283

EARTHQUAKE ENGINEERING. CONSTRUCTIONS SAFETY

04 2023

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
www.seismoconstruction.ru



Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений

Научно-технический журнал

«Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений» – сетевое научно-техническое рецензируемое издание, охватывающее весь спектр вопросов в области проектирования, строительства, эксплуатации объектов в сейсмически опасных районах России и стран СНГ.

Миссия журнала – развитие строительной науки в области сейсмостойкого строительства; публикация материалов и результатов фундаментальных исследований и достижений ученых, специалистов в области надежности и безопасности зданий и сооружений.

В журнале публикуются статьи по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);

2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);

2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки) (с 15 февраля 2023);

1.6.1 – Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки) (с 15 февраля 2023).

1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки).

Включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. В действующем Перечне от 17.07.2023 г. под номером 2339.

С 24 мая 2021 года журнал входит в Russian Science Citation Index (RSCI). Журнал принимает к публикации: оригинальные статьи, обзоры, дискуссионные материалы, комментарии, рецензии, информационные материалы.

ISSN: 2618-9283 (online) DOI: 10.37153/2618-9283

Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77-72754 от 17.05.2018 года. Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Издатель – Российская Ассоциация по сейсмостойкому строительству и защите от природных и техногенных воздействий (РАСС) (<http://raee.su>).

Учредитель – А.А. Бубис.

Сайт сетевого издания: <http://seismoconstruction.ru>

Адрес Издателя и редакции: 109428, город Москва, ул. 2-я Институтская, дом 6, строение 37.

Телефон: 8-499-174-75-82; 8-499-174-70-65. E-mail: info@raee.su

Периодичность: 6 раз в год

Даты выхода в свет: февраль, апрель, июнь, август, октябрь, декабрь.

Earthquake Engineering. Constructions Safety **Scientific and technical journal**

«Earthquake engineering. Constructions Safety» is a network scientific and technical peer-reviewed publication covering the entire range of issues in the field of design, construction, and operation of facilities in seismically dangerous areas of Russia and the CIS countries.

The mission of the journal is to develop the science of earthquake-resistant construction; to publish materials and results of fundamental research and achievements of scientists in the field of reliability and safety of buildings and structures.

The journal publishes articles on the following scientific specialties and related branches of science:

2.1.1 – Building structures, buildings and structures (technical sciences);

2.1.2 – Foundations, underground structures (technical sciences);

2.4.9 – Nuclear power plants, fuel cycle, radiation safety (technical sciences) the (from February, 15, 2023);

1.6.1 – General and regional geology. Geotectonics and geodynamics science (geological and mineralogical sciences) (from February, 15, 2023);

1.6.7 – Engineering geology, permafrost and soil science (geological and mineralogical sciences).

Included in the List of peer-reviewed scientific publications, where must be published basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of candidate of Sciences, on competition of a scientific degree of the doctor of Sciences, approved by Supreme Attestation Commission (VAK) of the Ministry of education and science.

In the current List of 17.07.2023 listed under the 2339 position.

Since May 24, 2021 included in the Russian Science Citation Index (RSCI).

The journal accepts for publication: original articles, reviews, discussion materials, comments, reviews, informational materials.

ISSN: 2618-9283 (online) **DOI:** 10.37153/2618-9283

Certificate of registration EL № FS 77-72754 dated 17.05.2018. Registered by the Federal service for supervision of communications, information technologies and mass communications (Roskomnadzor).

Publisher: Russian Association for earthquake-resistant construction and protection from natural and manmade hazards (RAEE) (<http://raee.su>).

The Founder: A.A. Bubis.

Website of the online publication: <http://seismoconstruction.ru>

Address of the **Publisher** and **editorial office:** 109428, Moscow, ul. 2-ya Institut'skaya, house 6, building 37. Phone: 8-499-174-75-82; 8-499-174-70-65.

E-mail: info@raee.su

Frequency: 6 times a year.

Release dates: February, April, June, August, October, December.

Главный редактор

Ведяков И.И., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Заместитель главного редактора

Бубис А.А., PhD, кандидат технических наук АО «НИЦ «Строительство»
(Москва, Российская Федерация)

Ответственный секретарь редколлегии

Смирнова Л.Н., кандидат технических наук
(Москва, Российская Федерация)

Редакционная коллегия

Акулов Н.И., доктор геолого-минералогических наук
(Иркутск, Российская Федерация)

Алешин А.С., доктор физико-математических наук
(Москва, Российская Федерация)

Белаш Т.А., доктор технических наук, профессор
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Вада Акира, доктор, профессор
(Токио, Япония)

Вознесенский Е.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Гусев Б.В., доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН
(Москва, Российская Федерация)

Захаров В.С., доктор геолого-минералогических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Ильичев В.А., доктор технических наук, профессор, Академик РААСН
(Москва, Российская Федерация)

Клементе Паоло, доктор, профессор
(Рим, Италия)

Кривцов Ю.В., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Лапин В.А., кандидат технических наук, профессор
(Алматы, Республика Казахстан)

Немчинов Ю.И., доктор технических наук, профессор
(Киев, Республика Украина)

Норозинежад Фарсанги Исан, доктор, профессор
(Керман, Иран)

Павленко О.В., доктор физико-математических наук
(Москва, Российская Федерация)

Римшин В.И., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Семенов В.А., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Тонких Г.П., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Уздин А.М., доктор технических наук, профессор
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Хакимов Ш.А., кандидат технических наук, профессор
(Ташкент, Республика Узбекистан)

Хачиян Э.Е., доктор технических наук, профессор
(Ереван, Республика Армения)

Чеверев В.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Чимелларо Джан Паоло, адъюнкт-профессор
(Турин, Италия)

Эмри И., доктор, профессор
(Любляна, Республика Словения)

«*EARTHQUAKE ENGINEERING. CONSTRUCTIONS SAFETY*»

Editor-in-Chief

Vedyakov I.I., Dr. Sci. (Engineering), Professor
(Moscow, Russian Federation)

Deputy editor-in-Chief

Bubis A.A., PhD (Engineering) JSC Research Center of Construction
(Moscow, Russian Federation)

(Moscow, Russian Federation)

Executive Secretary

Smirnova L.N., PhD (Engineering)
(Moscow, Russian Federation)

Editorial board

Akulov N.I., Dr. Sci. (Geology), Professor (Irkutsk, Russian Federation)

Aleshin A.S., Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor (Moscow, Russian Federation)

Belash T.A., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Saint-Petersburg, Russian Federation)

Wada Akira, PhD, Professor Emeritus (Tokyo, Japan)

Voznesenskii E.A., Dr. Sci. (Geology), Professor (Moscow, Russian Federation)

Gusev B.V., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Zakharov V.S., Dr. Sci. (Geology), Professor (Moscow, Russian Federation)

Il'ichev V.A., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)

Clemente Paolo, PhD, Professor (Rome, Italy)

Krivtsov Yu.V., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)

Lapin V.A., PhD, Professor (Almaty, Republic of Kazakhstan)

Nemchinov Yu.I., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Kiev, Ukraine)

Noroozinejad Farsangi Ehsan, PhD of Civil Engineering, Professor (Kerman, Iran)

Pavlenko O.V., Dr. Sci. (Mathematics and Physics) (Moscow, Russian Federation)

Rimshin V.I., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)

Semenov V.A., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)

Tonkikh G.P., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)

Uzdin A.M., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Saint-Petersburg, Russian Federation)

Khakimov Sh., PhD (Engineering), Professor (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

Khachiyan E.E., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Yerevan, Republic of Armenia)

Cheverev V.G., Dr. Sci. (Geology), Professor (Moscow, Russian Federation)

Cimellaro Gian Paolo, Associate Professor (Turin, Italy)
Emri Igor, PhD, Professor (Ljubljana, Republic of Slovenia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 4 – 2023

Теоретические и экспериментальные исследования

Горюнов О.В.

Сравнение методов сейсмического анализа в рамках
расчетно-аналитического подхода 8

Грневич К.М., Кокарева А.В., Уздин А.М., Нестерова О.П.

Некоторые особенности учета демпфирования для расчета
гармонических колебаний линейных систем 24

Соловьев С.А., Иньков А.Э., Соловьева А.А.

Оценка индекса надежности стержней ферм при интервальной
неопределенности исходных данных 30

Трекин Н.Н., Авдеев К.В., Кодыш В.Э., Шмаков С.Д.,

Черепанов А.В., Тучин М.А., Чаганов А.Б.

Разработка датчика для определения напряжений внутри
железобетонных конструкций. Часть 1 45

Проектирование, строительство и реконструкция сейсмостойких зданий и сооружений

Калиберда И.В., Пименов В.И.

Управление сроком эксплуатации гидротехнических
сооружений гидроэлектростанций 59

Фото на обложке номера из открытых источников (извержение вулкана Нишиношима).

CONTENTS

№ 4 – 2023

Theoretical and experimental studies

Goryunov O.V.

Comparison of seismic analysis methods within analytical approach **8**

Grenevich K.M., Kokareva A.V., Uzdin A.M., Nesterova O.P.

Some features of taking damping into account in calculating harmonic oscillations of linear systems **24**

Solovev S.A., Inkov A.E., Soloveva A.A.

The reliability index estimation of truss bars with interval uncertainty of statistical data **30**

Trekin N.N., Avdeev K.V., Kodysh V.E., Shmakov S.D.,

Cherepanov A.V., Tuchin M.A., Chaganov A.B.

Development of a sensor for determining stresses inside reinforced concrete structures. Part 1 **45**

Design, building and reconstruction of a seismic constructions

Kaliberda I.V., Pimenov V.I.

Life management of hydro engineering facilities of hydro power plants **59**

Photo on the cover of the issue – Nishinoshima-Volcanic-Activity from the open sources.

УДК 629.039.58

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-8-23](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-8-23)

Теоретические и экспериментальные исследования

Сравнение методов сейсмического анализа в рамках расчетно-аналитического подхода

Горюнов Олег Владимирович¹

¹АО РЭИН Инжиниринг. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В атомной энергетике обеспечение ядерной и радиационной безопасности имеет первостепенное значение, потому все аспекты, которые могут повлиять на безопасность, рассматриваются в детерминистической и вероятностной постановке.

В составе обоснования безопасности регламентируется учет землетрясения различных уровней интенсивности. При этом детерминистический анализ землетрясения и используемые модели и методы расчета являются достаточно устоявшимися. В вероятностной постановке к настоящему времени разработано и используется большое количество различных подходов в составе вероятностного анализа безопасности уровня 1. Результаты оценки условной вероятности отказа элементов систем, зданий и сооружений в зависимости от интенсивности сейсмического воздействия на свободной поверхности грунта площадки зависят от используемого в расчетах подхода.

Цели. Выполнить сравнительный анализ различных методов построения кривой вероятности отказа при сейсмическом воздействии.

Материалы и методы. Выполнен сравнительный анализ использования различных подходов к построению кривой отказа при сейсмическом воздействии для относительно простого случая.

Результаты. Результаты расчетов показали, что метод масштабирования приводит к наиболее консервативным результатам. Применение методов линеаризации и метода моментов дают более реалистичные оценки, что может положительно отразиться на результатах ВАБ уровня 1.

Выводы. Сравнительный анализ ряда подходов представляет определенный практический интерес и является актуальным, поскольку различные методы могут приводить к вкладу в вероятность тяжелой аварии более 50%, что создает существенный дисбаланс в безопасности АЭС.

Ключевые слова: сейсмическое воздействие, динамическое поведение, акселерограмма СА-482, моделирование, напряжения, вероятность отказа, ядерная безопасность

Для цитирования: Горюнов О.В. Сравнение методов сейсмического анализа в рамках расчетно-аналитического подхода // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 4. С. 8–23

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-8-23](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-8-23)

@ O.V. Goryunov, 2023

Theoretical and experimental studies

Comparison of seismic analysis methods within analytical approach

Oleg V. Goryunov¹

¹JSC REIN Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract

Introduction. In the nuclear power industry, ensuring nuclear and radiation safety is of paramount importance, therefore all aspects that may affect safety are considered in a deterministic and probabilistic approaches.

As part of the safety justification, consideration of earthquakes of various intensity levels is regulated by safety standards. At the same time, the deterministic analysis of the earthquake and the models and calculation methods used are quite well-established, and in the probabilistic way, a relatively large number of different approaches have been developed and used as part of PSA level 1. The results of the evaluation of the conditional probability of failure of system elements, buildings and structures depending on the intensity of seismic impact on the free ground surface of the site depends on the approach used for the calculations.

Aims. To perform a comparative analysis of various methods for constructing a failure probability curve under seismic impact.

Materials and methods. A comparative analysis of the use of various approaches to the construction of a failure curve under seismic impact for a relatively simple case is performed. The results of the calculations showed that the scaling method leads to the most conservative results. The use of linearization methods and the method of moments give more realistic estimates, which can have a positive impact on the results of PSA level 1.

Conclusions. A comparative analysis of some approaches has practical interest and is relevant, since various methods can contribute more than 50% to the core damage frequency, which creates a significant imbalance in the safety of nuclear power plants.

Keywords: seismic impact, dynamic modeling, accelerogram CA-482, modeling, stress, probability of failure, nuclear safety

For citation: Goryunov O.V. Comparison of seismic analysis methods within analytical approach. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 4, pp. 8–23. [In Russian]

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-8-23](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-8-23)

Введение

В атомной энергетике обеспечение ядерной и радиационной безопасности имеют первостепенное значение, потому все аспекты, которые могут повлиять на безопасность, рассматриваются в детерминистической и вероятностной постановке.

В НП 001-15 представлены количественные целевые показатели, регламентирующие значение вероятности возникновения тяжелых аварий с повреждениями активной зоны и частоту превышения предельного выброса радиоактивных веществ в окружающую среду, которые следует подтверждать путем выполнения вероятностного анализа безопасности (ВАБ). В соответствии с п.1.2.17 НП 001-15 значение суммарной вероятности тяжелых аварий не должно превышать 10^{-5} на реактор за один год, а вероятность предельного аварийного выброса – 10^{-7} на реактор за один год.

Одной из составных частей полномасштабного ВАБ уровня 1 является ВАБ сейсмических воздействий, разрабатываемого для всех возможных эксплуатационных состояний. В состав целей и задач ВАБ сейсмических воздействий входят:

- оценка граничной сейсмостойкости блока АС как характеристики устойчивости к сейсмическим воздействиям, превышающим уровень МРЗ;
- вероятностный анализ реакции зданий (сооружений) на сейсмические воздействия.

При сейсмическом воздействии (кинематическое возмущение) вынужденные колебания конструкции происходят под действием переносного движения – колебаний ее основания [4].

Целью оценки сейсмической повреждаемости элементов систем, зданий и сооружений при сейсмических воздействиях является оценка условных вероятностей отказа в зависимости от интенсивности сейсмического воздействия на свободной поверхности грунта площадки (максимального или спектрального (для фиксированного диапазона частот) ускорения a_0) для различных уровней доверительной вероятности.

Кривая вероятности отказа элемента при сейсмическом воздействии зависит от используемого подхода. Методы расчета конструкций на сейсмическую прочность в российских нормах делятся в зависимости от степени ответственности сооружений. Существует два основных метода расчета:

- линейно-спектральный (квазистатический),
- прямой динамический анализ.

Линейно-спектральный анализ использует в своих расчетах обозначенный в нормах спектр отклика (соответствующий категории грунта). В основу линейно-спектрального метода положен метод приведения, который позволяет свести линейную систему с N степенями свободы к N эквивалентным системам с одной степенью свободы, наложение колебаний которых дает в сумме колебание исходной системы.

Прямой динамический метод позволяет произвести расчет на заданные акселерограммы с использованием прямого интегрирования без разложения по формам, что дает более точный результат.

Таким образом, входными данными для выполнения расчета на сейсмическое воздействие являются:

- синтезированная сейсмограмма свободной поверхности;
- спектр ответа грунта.

Традиционно предполагается, что кривая отказа элемента системы или здания удовлетворительно для практики описывается нормальным или логарифмически нормальным распределением, которое полностью определяется двумя параметрами: математическим ожиданием и дисперсией параметра, характеризующего запас до достижения предельного состояния.

Для любого заданного уровня интенсивности сейсмического воздействия a_0 реакция Q в элементе будет представлять собой случайную величину. Обычно предполагается, что нагрузка Q и несущая способность R являются независимыми случайными величинами, распределенными по нормальному или логнормальному закону, хотя для Q это допущение не всегда справедливо [1]. Запас несущей способности $R - Q$ элемента является случайной величиной, обусловленной разбросом всех входных параметров расчетной модели: физико-механические и теплофизические характеристики материалов, геометрические размеры, параметры рассеяния энергии, факторы системы передачи воздействия от колебаний поверхности грунта к элементу (разброс свойств грунтового основания, жесткостных и массовых характеристик элементов строительных конструкций, демпфирования) и др. В общем случае процедура определения кривой сейсмической повреждаемости элемента сводится к определению совместной плотности вероятности реакции, действующей на элемент, и его несущей способности. В частном случае, когда расчетные величины можно разделить на две группы, где первая включает характеристики, относящиеся к свойствам самой конструкции, а вторая характеризует

внешние воздействия, в приложении к задачам расчета на прочность условие отказа математически будет выражаться неравенством [2, Приложение № 6]:

$$R < Q,$$

где Q – реакция или нагрузочный эффект; R – несущая способность.

Если случайные величины R и Q независимы, математическое ожидание и стандартное отклонение резерва прочности соответственно равны:

Для нормального распределения случайных величин вероятность отказа определяется по формуле:

$$P_f = \Phi \left(\frac{m_Q - m_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \right),$$

где $\Phi(x)$ - функция стандартного нормального распределения; m_R и σ_R – математическое ожидание и стандартное отклонение распределения несущей способности; m_Q и σ_Q – математическое ожидание и стандартное отклонение распределения нагрузочного эффекта.

Если функции R и Q распределены логарифмически нормально и независимы, приведенное выше соотношение можно представить в виде:

$$P_f = \Phi \left(\frac{m_{\ln Q} - m_{\ln R}}{\sqrt{\sigma_{\ln R}^2 + \sigma_{\ln Q}^2}} \right). \quad (1a)$$

Если Q_m и R_m – медианные значения «нагрузки» Q и «прочности» R , то $m_{\ln R} = \ln(R_m)$, $m_{\ln Q} = \ln(Q_m)$, $\sigma_{\ln Q} = \beta_Q$, $\sigma_{\ln R} = \beta_R$, $\beta_C = (\beta_R^2 + \beta_Q^2)^{1/2}$, тогда при землетрясении с ускорением на свободной поверхности «а» случайной величиной будет нагрузка на рассматриваемый элемент $Q(a)$, а ее медиана – $Q_m(a)$ и для рассматриваемого элемента справедливо:

$$P_f(a) = \Phi \left(\frac{\ln(Q_m(a)/R_m)}{\beta_C} \right). \quad (1b)$$

Указанное соотношение в общем виде определяет кривую повреждаемости элемента с параметрами R_m и β_C .

В настоящее время разработано относительно большое количество подходов к построению кривой сейсмической повреждаемости. Наиболее часто на практике используются следующие методы, основанные на различных предположениях и допущениях:

1. Метод повреждаемости (масштабирования) [2, Приложения № 3, 4, 6];
2. Метод статистической линеаризации;
3. Метод моментов.

На практике во всех трех подходах традиционно используется допущение, что кривая сейсмического повреждения описывается логнормальным распределением (1). Логнормальная модель проста в использовании и может быть частично оправдана Центральной предельной теоремой, поскольку общий коэффициент безопасности является произведением нескольких отдельных коэффициентов безопасности. Ряд авторов [4, 5] также пришли к аналогичным выводам.

Таким образом, построение кривой сводится к определению параметров, входящих в выражения (1a), (1b).

Сравнительный анализ указанных подходов представляет определенный практический интерес и является актуальным, поскольку использование консервативных

подходов может приводить к вкладу в вероятность тяжелой аварии более 50%, и создает существенный дисбаланс в безопасности АЭС. Цель настоящей работы - на относительно простом примере сравнить кривые отказа, получаемые различными методами.

Краткое описание подходов

Метод повреждаемости (масштабирования)

Переходя от нагрузок и несущей способности на элемент (на отметке) к нагрузкам и несущей способности на свободной поверхности, выраженным в ускорениях, получим традиционный вид кривой сейсмической повреждаемости в виде двойной логарифмически нормально-распределенной случайной величины для доверительной вероятности q :

$$P_f(a) = \Phi\left(\frac{\ln(a/A_m) + \beta_U \Phi^{-1}(q)}{\beta_R}\right), \quad (1c)$$

где β_R , β_U – логарифмически стандартные отклонения, характеризующие алеаторный и эпистемический разбросы, соответственно.

Алеаторный разброс (неопределенность) - разброс значений параметра явления вследствие его случайной (стохастической) природы (ее источником является какой-либо шум в данных). В этом случае параметру соответствует функция распределения вероятности.

Эпистемический разброс (неопределенность) - разброс, отражающий неопределенность, связанную с недостаточной изученностью рассматриваемого явления (вследствие неполноты знаний или информации), что препятствует возможности точнее это явление моделировать. Эпистемическая неопределенность может быть снижена за счет получения дополнительного объема информации.

Характеристики распределения (1c) определяется из выражения:

$$A = F \cdot A_{MP3},$$

где F – статистический коэффициент запаса.

Теоретической основой подхода является несущественное отличие значений нормального и логнормального распределений при коэффициенте вариации менее $v < 0,3$ в зоне практического применения в рассматриваемой задаче.

Для оборудования (F – подчиняется логнормальному распределению)

$$F = (F_S \cdot F_\mu) \times F_{RE} \times F_{RS}$$

$$F_S = ([Q] - Q_{НЭ}) / (Q_{MP3+НЭ} - Q_{НЭ})$$

где $Q_{НЭ}$ – нагрузка, возникающая при НЭ, $Q_{MP3+НЭ}$ – нагрузка от совместного воздействия землетрясения уровня МРЗ и НЭ; $[Q]$ – предельная нагрузка; F_μ – коэффициент, учитывающий рассеяние энергии за пределами упругости; F_{RE} - коэффициент реакции оборудования относительно сооружения, в котором оно установлено; F_{RS} - коэффициент реакции сооружения. Параметры коэффициента реакции F_{RE} : метод расчета, демпфирование, моделирование, суммирование собственных форм и комбинация компонент землетрясения. Составляющие коэффициента F_{RS} : форма спектра, демпфирование, моделирование, суммирование по формам и учет пространственного и асинхронного характера действия внешнего воздействия на сооружение (некогерентность).

Коэффициент реакции конструкции – случайная величина, которая учитывает, что расчеты, выполненные в рамках проекта, основаны на определенных (консервативных)

детерминистических параметрах конструкции и реакции в ней. В зависимости от необходимости учета факторов, влияющих на реакцию конструкции, он может быть определен в виде произведения, например, соответствующих коэффициентов случайных величин [3], где в виде коэффициентов могут быть учтены различные факторы, например:

- отличие и разброс в реакции вследствие отличия проектного спектра и спектра, полученного в результате анализа сейсмической опасности площадки;
- некогерентность сейсмических волн;
- отличие реалистичного демпфирования от демпфирования согласно нормативным документам;
- неопределенность расчетных моделей;
- методы сложения собственных форм;
- метод учета совместного воздействия пространственных компонент воздействия;
- эффекты взаимодействия «грунт–сооружение» включая изменение интенсивности воздействия с глубиной относительно земной поверхности для заглубленных сооружений.

Определим следующие составляющие коэффициента F , которые будут рассмотрены далее:

F_{SS} (Mode Shape) – отличие и разброс в реакции вследствие отличия формы проектного спектра (например, нормативного) и спектра, полученного в результате вероятностного анализа сейсмической опасности площадки.

F_{GMI} (Ground Motion Incoherence) – учет пространственного и асинхронного характера действия внешнего воздействия на сооружение (некогерентность).

F_d – коэффициент различия в демпфировании, учитывающий погрешности в представлении реального демпфирования принятым в проекте демпфированием.

F_M – коэффициент, учитывающий отклонения и неопределенность моделирования (modelling factor accounting for uncertainty in response due to modelling assumptions).

F_{MC} (Mode Combination) – коэффициент сложения собственных форм, учитывающий отклонения и погрешности в реакции из-за метода, используемого для сложения собственных форм (SSRS, 100-40-40, CQC).

F_{EC} (earthquake component combination) – коэффициент сложения компонент землетрясения, учитывающий отклонения и погрешности в реакции вследствие метода учета совместного воздействия пространственных компонент воздействия.

F_{SSI} – коэффициент, учитывающий эффекты взаимодействия грунт–сооружение, включая снижение интенсивности воздействия с глубиной относительно земной поверхности.

Значения используемых значений коэффициентов представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Числовые значения коэффициентов

Table 1 – Numerical values of coefficients

F	F _m	β _U	β _R
F _S	$\frac{M[Q] - Q_{НЭ}}{Q_{МРЗ+НЭ} - Q_{НЭ}}$	βQ	0
F _μ	1	0	0
F _{SS**}	1	0.1	0.17
F _{GMI***}	1.14	0.065	0
F _{d**}	1	0,17	0
F _M	1	0.04*	0
F _{MC**}	1	0	0.15
F _{EC***}	1	0	0.18
F _{SSI}	1	0	0

* в соответствии с аттестационным паспортом программы для ЭВМ ANSYS (в качестве примера)
 ** EPRI TR-103959 [4]
 *** принято в качестве примера в соответствии с РБ 123 17 [2]

Метод статистической линеаризации

Может быть использован, если известна явная функциональная зависимость реакции системы от входных параметров. Явная связь может быть также получена на основе интерполяции [1, 4].

Если известна явная функциональная зависимость $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$, то, пользуясь разложением Тейлора в точке \bar{M} , соответствующей значениям математических ожиданий аргументов x_k функции

$$f(\vec{x}) = f(\bar{M}) + \nabla f(\bar{M}) \cdot (\vec{x} - \bar{M})$$

можно оценить в первом приближении параметры распределения:

$$M[f(\vec{x})] = f(\bar{M})$$

$$D[f(\vec{x})] = \sum_k \left(\frac{\partial f(\bar{M})}{\partial x_k} \right)^2 D[x_k],$$

где $M[x]$ – операция математического ожидания (МО) величины x , $D[x]$ – операция дисперсии случайной величины x .

Разложение до второго порядка малости может приводить к консервативным результатам, поскольку в этом случае оценка МО будет дополняться положительным слагаемым [1].

Если $f(x_1, \dots, x_N, R) = Q(x_1, \dots, x_N) - R$, то определяя первый и второй центральные моменты, используя формулы выше – получаем параметры логнормального распределения (1с), которое будет описывать распределение несущей способности рассматриваемого элемента.

Метод моментов

Метод моментов основан на вычислении первого и второго моментов на базе набора нескольких решений уравнения колебания, полученных с различными значениями входных параметров, т.е. на основе многовариантных расчетов (например, с применением латинского гиперкуба). Варьирование параметров производится в рамках определенных интервалов [6, 7].

Результатом применения метода являются математическое ожидание и дисперсия (вариация) интересующего параметра реакции системы (деформация, напряжение).

Эпистемическая неопределенность для последних двух подходов принимается соответствующей неопределенности расчетного метода или программы для ЭВМ (в соответствии с аттестационным паспортом).

Расчет отклика системы

Часто для «грубой» (экспресс) оценки модель исследуемого объекта упрощают с целью более быстрого получения необходимых оценок параметров. Рассмотрим вертикально установленный стальной трубопровод Ø89x4 из стали 20 длиной 10 м [8] жестко закрепленный в основании ($x = 0$) и свободным концом ($x = L$), находящийся в покое. Сейсмическое воздействие, характеризуется ускорением свободной поверхности с компонентами $\{1, 0, 0\} \times A(t)$, м/с². Значение $A_{MP3} = 2,5$ м/с². Физико-механические характеристики материала, геометрические размеры и используемые обозначения представлены в Таблице 2.

Поскольку объект исследования является относительно простым – решение уравнения колебаний для рассматриваемого можно выполнить аналитическим методом. Уравнение, начальные и граничные условия имеют вид ($M_y = M_z = 0$, $M_x \neq 0$, $Q_x = 0$, $Q_y \neq 0$, $Q_z \neq 0$):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 u_{\text{отн}}}{\partial z^4} + \frac{\rho S}{EJ} \frac{\partial^2 u_{\text{отн}}}{\partial t^2} &= -\frac{\rho S}{EJ} A \\ u_{\text{отн}}|_{t=0} = 0, \frac{\partial u_{\text{отн}}}{\partial t}|_{t=0} &= 0 \\ u_{\text{отн}}|_{z=0} = \frac{\partial u_{\text{отн}}}{\partial z}|_{z=0} = 0, \frac{\partial^2 u_{\text{отн}}}{\partial z^2}|_{z=L} = \frac{\partial^3 u_{\text{отн}}}{\partial z^3}|_{z=L} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

В связи с отсутствием паспортных данных по пределу текучести и пределу прочности, статистическое распределение можно получить следующим образом:

1. принимается нормальный закон распределения;
2. гарантированное значение механической характеристики материала (предел прочности или предел текучести) соответствует квантили нормального распределения $\alpha = 0,05$ (т.е. детерминированное значение механических свойств является нижним 5-процентным значением функции распределения);
3. СКО составляет 10% от значения МО для распределения предела текучести;
4. СКО составляет 5% от значения МО для распределения предела прочности;

Таблица 2– Варьируемые параметры

Table 2 –Variable parameters

Параметр	Обозначение	Нормативное значение	Предельное отклонение, %	МО	Вариация
Внешний диаметр, мм	D	89	± 1 *	89	0.006
Толщина стенки, мм	s	4	$\pm 12,5$ *	4	0.076
Длина, м	L	12	+ 10мм/12м*	12	0.001
Модуль Юнга, МПа	E	$2 \cdot 10^5$	5	$2 \cdot 10^5$	0.03
Плотность, кг/м ³	ρ	7850*	0	7850	0
Предел текучести, МПа	σ_T	216	$\pm 16,5$	258	0,1
Предел прочности, МПа	σ_B	402	$\pm 8,2$	438	0,05
Коэффициент демпфирования, % критического	K	5**			0.1
* ГОСТ 8732-78 [8]					
** НП 031 01 [15]					

В качестве акселерограммы примем синтезированную акселерограмму SA-482 (см. рисунки 1 – 3), обобщающую в себе свойства всех типов акселерограмм: низкочастотных (Бухарест), высокочастотных (Газли) и среднечастотных (Эль-Центро). Указанная акселерограмма создавалась по специальной методике [9].

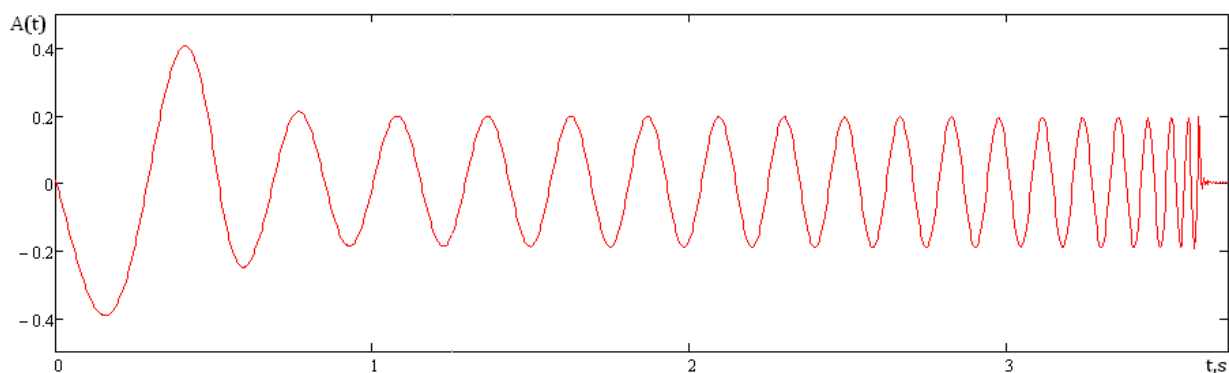


Рисунок 1 – Синтезированная акселерограмма SA-482

Figure 1 – Synthesized accelerogram SA-482

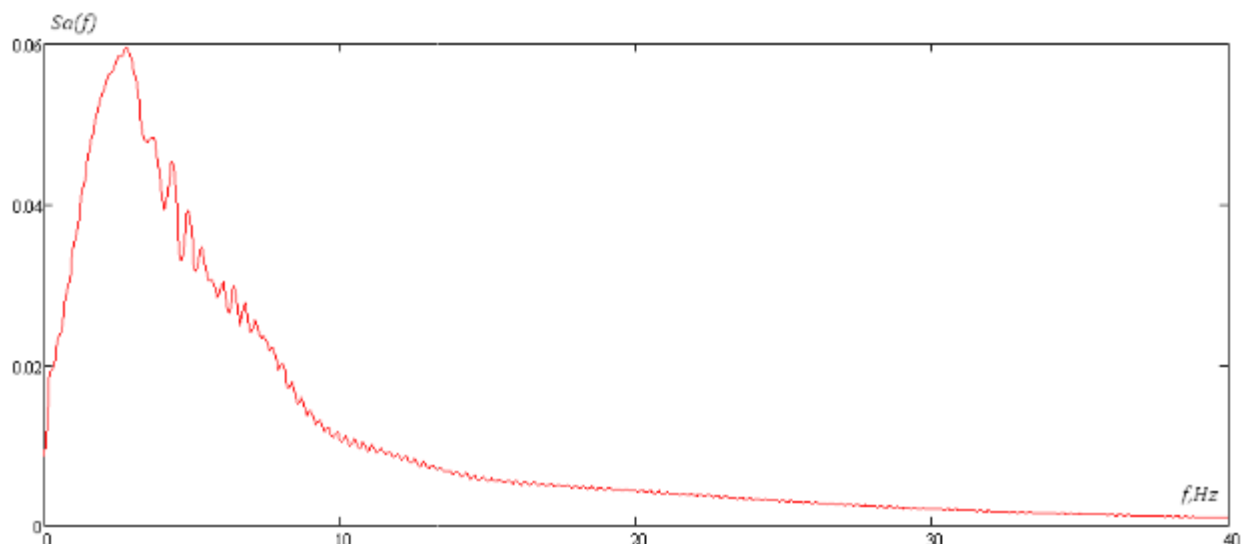


Рисунок 2– Спектральная плотность синтезированной акселерограммы СА-482

Figure 2– Spectral density of the synthesized accelerogram SA-482

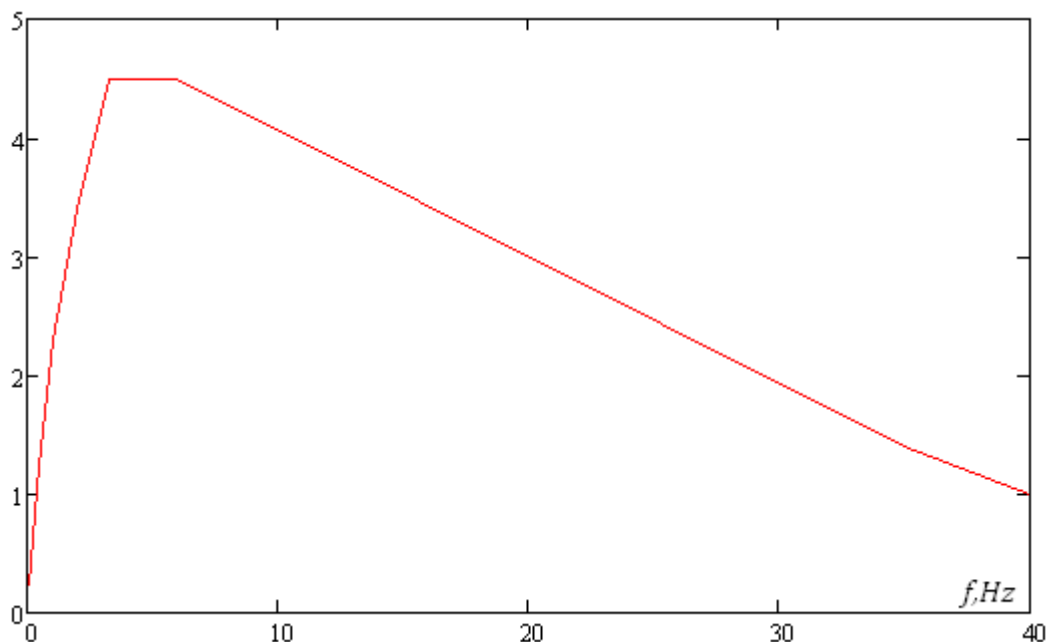


Рисунок 3– Спектр ответа ($\beta = 5\%$)

Figure 3– Response spectrum ($\beta = 5\%$)

Известно [10], что уравнение собственных частот колебания, соответствующее уравнению (2) имеет вид: $\text{ch}z_m \cos z_m + 1 = 0$, откуда $z_1 = 1,875$, а для $m > 1$ с удовлетворительной для инженерных расчетов точностью можно использовать формулу

$$z_m = \frac{2m-1}{2} \pi + \frac{(-1)^m}{\text{ch}((2m-1)\pi/2)}.$$

Собственные частоты колебаний определяются выражением: $\omega_m = z_m^2/(aL^2)$, Гц; $a^2 = \rho S/EJ$, $\text{с}^2/\text{м}^4$. Нормированные собственные формы $H_m(x)$, $\text{м}^{-1/2}$, представлены на рисунке 4А, а соответствующие модальные напряжения на рисунке 4В.

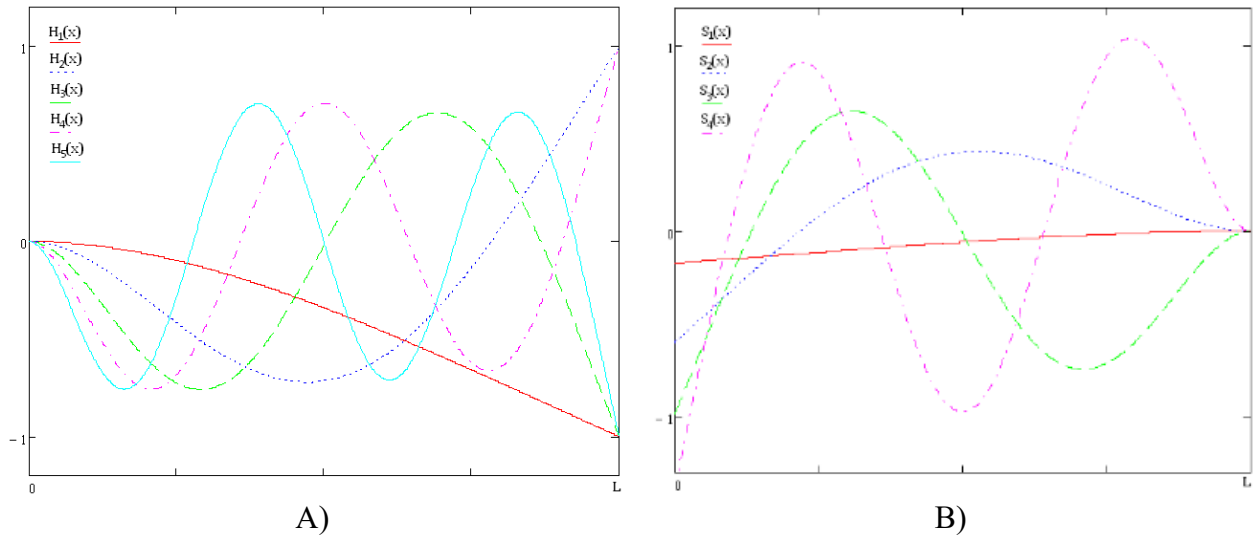


Рисунок 4 – Нормированные собственные формы колебаний стержня (А).
 Модальные нормальные напряжения, б/р (В)
 Figure 4 –Normalized natural forms of vibrations of the rod (A)
 Modal normal stresses (B)

Отклик рассматриваемой конструкции, полученный на основе динамического метода, имеет вид:

$$u_{отн}(z, t) = - \sum_k H_m(z) \cdot 1_m \int_0^t A(\tau) e^{-\beta \omega_m(t-\tau)} \frac{\sin \omega_m \sqrt{1-\beta^2} (t-\tau) d\tau}{\omega_m \sqrt{1-\beta^2}}$$

где $H_m(z)$ – ортонормированные формы колебаний $\int_0^L H_n(x) \cdot H_m(x) dx = \delta_{mn}$, $1_m = \int_0^L H_m(x) dx$ – коэффициент участия m -й моды, β – значение затухания колебаний в процентах от критического.

В соответствии с линейно спектральным методом вектор перемещений определяется выражением [11]:

$$u_y(z) = A_{max} \sum_m U_m(z)$$

$$U_m(z) = \frac{k_a(\omega_m, \beta)}{\omega_m^2} \cdot |H_m(z)| \int_0^L H_m(x) dx$$

где $k_a(\omega, \beta)$ – коэффициент динамичности по ускорению, $U_m(z)$ – модальный отклик перемещения для собственной частоты ω_m .

Тензор напряжений при изгибе имеет вид (ось z совпадает с нейтральной осью балки):

$$\sigma = \begin{pmatrix} 0 & \tau_{yz} \\ \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

Нормальное напряжение σ_z при поперечном изгибе определяется известным выражением:

$$\sigma_z(y, z) = \frac{M_x(z)}{W_x}, M_x(z) = -EJ_x \frac{\partial^2 u_y(z)}{\partial z^2}$$

$W_x = J_x/y_{\max} = \{\pi(D^4 - d^4)/64\}/(D/2)$ – момент сопротивления сечения балки (трубы) при изгибе, m^3 [10]; $J_x = \pi(D^4 - d^4)/64$ – момент инерции поперечного сечения (труба) относительно нейтральной оси.

Когда балка изгибается поперечными нагрузками, то в каком-либо поперечном сечении балки возникают не только нормальные напряжения σ_z , но также и касательные напряжения τ_{yz} (направлено параллельно оси z в плоскости, перпендикулярной оси y).

В случае чистого изгиба нормальные напряжения по граням будут равны и взаимно уравновесятся – тогда касательные напряжения $\tau_{yz} = 0$. Следствием действия касательных напряжений является сдвиг, который заставляет поперечные сечения, первоначально плоские, искривляться. Касательные напряжения при изгибе тонкостенного трубопровода имеют вид [12]:

$$\tau_{yz}(y, z) = \frac{2}{\pi D_s} Q_y \sin \theta$$

$$Q_y(z) = \frac{dM_x}{dz}$$

При использовании линейно-спектрального метода суммирование результатов по всем учитываемым формам проводится по методике полной квадратичной комбинации (CQC) [13], в которой все члены суммируются с учетом знаков и определенных по данной методике коэффициентов влияния. Применение данного метода позволяет избежать погрешностей вычислений, возникающих при использовании метода среднеквадратичного суммирования (SRSS) для систем с близкими собственными частотами. Например, компонента момента M_x (аналогично для Q_y), определяется из выражения:

$$M_x(z) = \sqrt{\sum_{j=1}^s \sum_{n=1}^s m_{jx}(z) \cdot \rho_{jn} \cdot m_{nx}(z)}$$

$$m_{nx}(z) = -EJ_x \frac{\partial^2 U_{my}(z)}{\partial z^2}$$

$$\rho_{jn} = \frac{8\beta^2(1+r)r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4\beta^2 r(1+r)^2}, r = \frac{w_n}{w_j} > 1$$

Значения приведенных напряжений в сечениях трубопровода от действия сейсмических нагрузок определяются по формуле [14, 15]:

$$(\sigma_s)_2 = \sigma_1 - \sigma_3$$

где σ_1, σ_3 – главные напряжения. Для рассматриваемого случая $(\sigma)_2 = 0$, поскольку нагрузки от собственного веса пренебрежимо малы.

Используя представленные выше подходы и найденные выше решения уравнения колебаний, можно построить соответствующие кривые отказа. Поле приведенных напряжений $(\sigma_s)_2$ представлено на рисунке 5. На Рисунке 6 представлены медианные кривые отказа, полученные в рамках представленных выше подходов. Значение NCLPF представлены в Таблице 3.

Таблица 3 – Значения ВДНВО (высокой достоверности низкой вероятности отказа)

Table 3 – HCLPF (high confidence of low probability of failure) values

Наименование метода	Обозначение кривой отказа	HCLPF, g
Метод повреждаемости (масштабирования)	G1(a)	0.39
Метод статистической линейаризации	G2(a)	0.57
Метод моментов	G3(a)	0.55

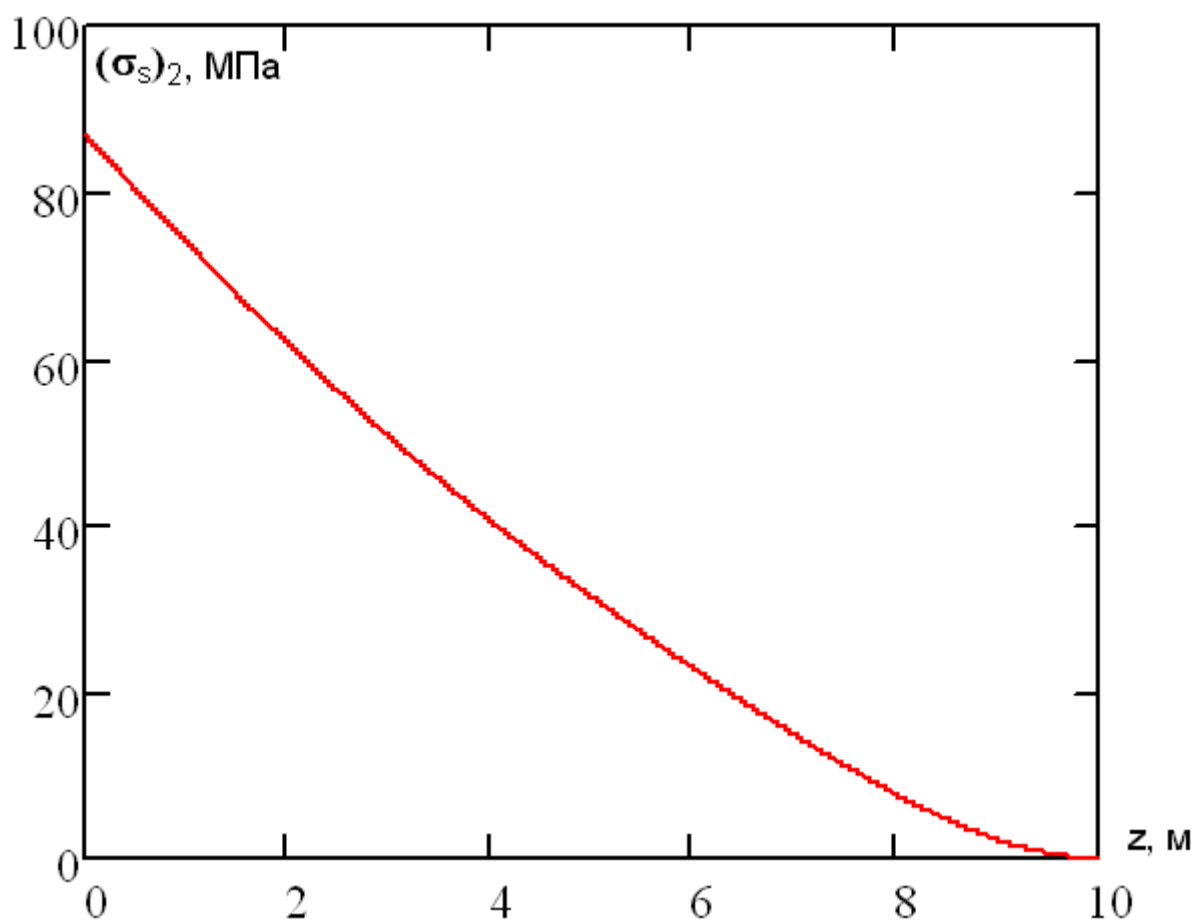


Рисунок 5 – Зависимость значения $(\sigma_s)_2$ от высоты

Figure 5 – Dependence $(\sigma_s)_2$ from height

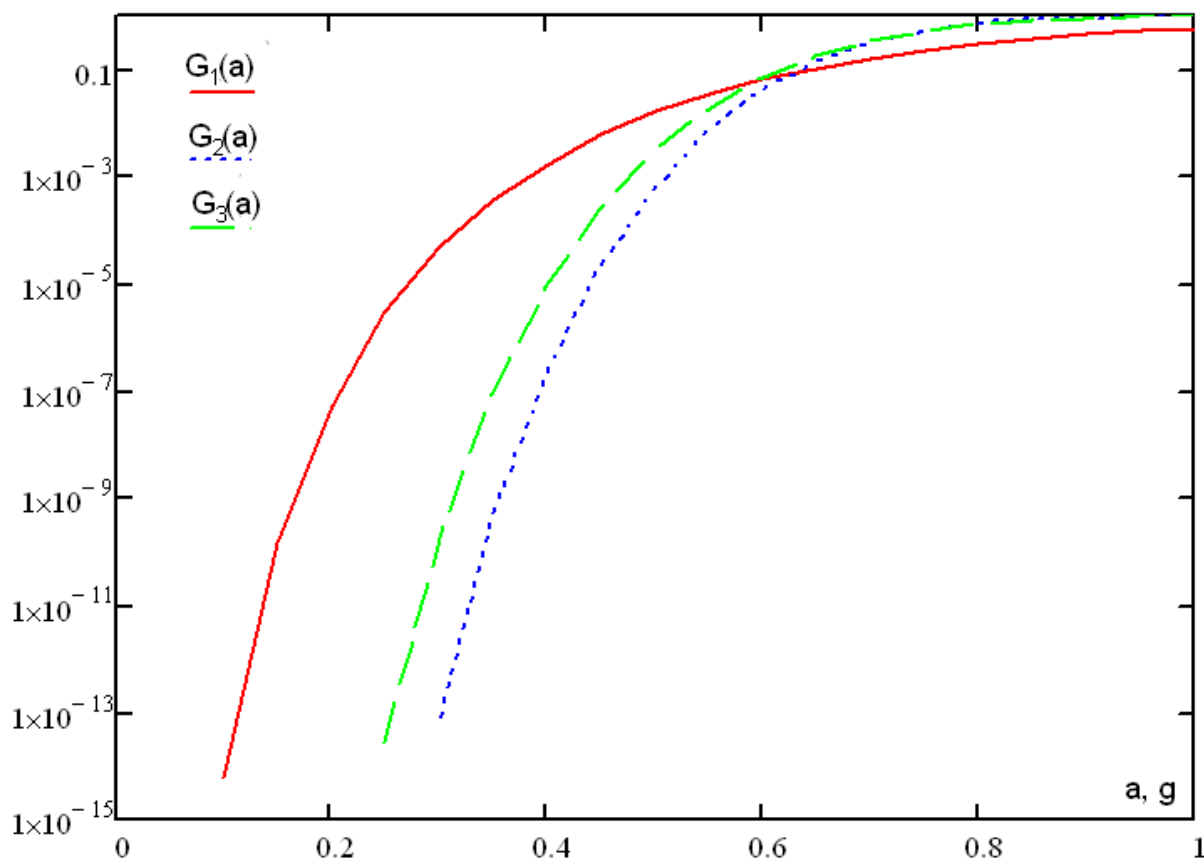


Рисунок 6 – Медианные кривые отказа при сейсмическом воздействии

Figure 6 – Median failure curves for seismic impact

Заклучение

На примере простого случая рассмотрено динамическое поведение/отклик при кинематическом (сейсмическом) воздействии. Для оценки параметров отклика использовался теоретический метод. В качестве сейсмического воздействия использовалась обобщенная синтезированная акселерограмма СА-482.

Выполнен сравнительный анализ использования различных подходов к построению кривой отказа при сейсмическом воздействии для относительно простого случая. Результаты показали, что метод масштабирования приводит к наиболее консервативным результатам. Применение методов линеаризации и метода моментов дают более реалистичные оценки, что может положительно отразиться на результатах ВАБ уровня 1.

Список литературы

1. Горюнов О.В. Интерполяционный метод оценки вероятности отказа при сложном нагружении / О.В. Горюнов, Н.Н. Куриков, К.А. Егоров // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2023. № 1. С. 42–52.
2. РБ 123-17 Основные рекомендации к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для блока атомной станции при исходных событиях, обусловленных сейсмическими воздействиями. Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ». 2017. 77 с.
3. IAEA-TECDOC-1487 Advanced nuclear plant design options to cope with external events, IAEA, 2006.

4. Reed J.W., Kennedy R.P., Methodology for developing seismic fragilities, EPRI TR-103959, Research Project RP2722-23, prepared for Electric Power Research Institute, Palo Alto, California (June 1994).
5. Ellingwood B. Validation of seismic probabilistic risk assessments of nuclear power plants, NUREG/GR-0008, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland (January 1994).
6. Горюнов О.В., Егоров К.А., Куриков Н.Н. Оценка вероятности отказа защитной оболочки ВВЭР-1000 // *Тяжелое машиностроение*. 2020. № 7–8. С. 7–15.
7. Siti Nur Aqilah Saruddin, Fadzli Mohamed Nazri Fragility curves for low- and mid-rise buildings in Malaysia, *Procedia Engineering*, 125 (2015), pp. 873 – 878.
8. ГОСТ 8732-78 Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент. Москва: ИПК Издательство стандартов. 1979.
9. Ветошкин В.А. Синтезированная модель сейсмического воздействия. Ленинград: Труды ЦКТИ. 1984. Вып. 212. С. 41 – 52.
10. Тимошенко С.П. и др. Колебания в инженерном деле. Москва: Машиностроение. 1985. 472 с.
11. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. С-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2009. 594 с.
12. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1986. 560 с.
13. Wilson E.L., Kinreyhian A.D., Bayc E.P. A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 1981, vol. 9, no 2, pp.187–192.
14. ПНАЭ Г 7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Москва: Энергоатомиздат. 1989. 525 с.
15. НП-031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ». 2017. 77 с.

References

1. Goryunov O.V. Interpolyatsionnyj metod otsenki veroyatnosti otказа pri slozhnom nagruzhении / O.V. Goryunov, N.N. Kurikov, K.A. Egorov. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2023, no. 1, pp. 42–52. [In Russian]
2. RB 123-17 Osnovnye rekomendatsii k razrabotke veroyatnostnogo analiza bezopasnosti urovnya 1 dlya bloka atomnoj stantsii pri iskhodnyh sobyitiyah, obuslovlennyh sejsmicheskimi vozdeystviyami. Moscow: FBU «NTC YARB». 2017, 77 p. [In Russian]
3. IAEA-TECDOC-1487 Advanced nuclear plant design options to cope with external events, IAEA, 2006.
4. Reed J.W., Kennedy R.P., Methodology for developing seismic fragilities, EPRI TR-103959, Research Project RP2722-23, prepared for Electric Power Research Institute, Palo Alto, California (June 1994).
5. Ellingwood B. Validation of seismic probabilistic risk assessments of nuclear power plants, NUREG/GR-0008, The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland (January 1994).
6. Goryunov O.V., Egorov K.A., Kurikov N.N. Ocenka veroyatnosti otказа zashchitnoj obolochki VVER-1000. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2020, no. 7–8, pp.7–15. [In Russian]
7. Siti Nur Aqilah Saruddin, Fadzli Mohamed Nazri Fragility curves for low- and mid-rise buildings in Malaysia, *Procedia Engineering*, 125 (2015), pp. 873 – 878.
8. State Standard 8732-78. Truby stal'nye besshovnye goryachedeformirovannye. Sortament. Moscow: IPK izdatelstvo standartov, 1979. [In Russian]
9. Vetoshkin V.A. Sintezirovannaya model' sejsmicheskogo vozdeystviya. Leningrad: Trudy CKTI. 1984, vyp. 212, pp. 41–52. [In Russian]

10. Timoshenko S.P. i dr. Kolebaniya v inzhenernom dele. Moscow: Mashinostroenie. 1985, 472 p.
11. Birbraer A.N., Roleder A.Yu. Ekstremal'nye vozdejstviya na sooruzheniya. S-Pb.: Izd-vo Politekhn. un-ta. 2009, 594 p. [In Russian]
12. Birger I.A., Mavlyutov R.R. Soprotivlenie materialov. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit. 1986, 560 p. [In Russian]
13. Wilson E.L., Kinreyhian A.D., Bayc E.P. A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 1981, vol. 9, no. 2, pp.187–192.
14. PNAE G 7-002-86 Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnyh energeticheskikh ustanovok. Moscow: Energoatomizdat. 1989, 525 p. [In Russian]
15. NP-031-01 Normy proektirovaniya sejsmostojkih atomnyh stancij. Moscow: FBU «NTC YARB». 2017, 77 p. [In Russian]

Информация об авторе / Information about author

Горюнов Олег Владимирович, кандидат технических наук, главный специалист,
АО РЭИН Инжиниринг. Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: ovgoriunov@mail.ru

Oleg Vladimirovich Goryunov

Chief Engineer, Cand. Sci. (Engineering), JSC REIN Engineering.
Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: ovgoriunov@mail.ru

УДК 699.841

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-24-29](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-24-29)

Теоретические и экспериментальные исследования

Некоторые особенности учета демпфирования для расчета гармонических колебаний линейных систем

**Грневич Ксения Михайловна¹, Кокарева Анна Владимировна²,
Уздин Александр Михайлович³, Нестерова Ольга Павловна⁴**

^{1, 2, 3} Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС).

Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ).

Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрена задача гармонических колебаний линейной демпфированной системы с неоднородным демпфированием. Наряду с имеющимся в литературе решением, требующем обращения матрицы, определяющей собственные числа недемпфированной системы, приведено новое решение, которое не требует обращения указанной матрицы, но требует обращения матрицы демпфирования системы. Рассмотрены случаи гистерезисного, вязкого и смешенного демпфирования. Показано, что вблизи резонанса известное решение дает ошибку. В резонансной точке результат вообще не определен, а вблизи резонанса может быть неверным. Приведен пример построения амплитудно–частотной характеристики системы с двумя динамическими гасителями колебаний и тремя пиками на амплитудно–частотной характеристике. Предлагаемые формулы расчета смещений удобны для построения амплитудно–частотных характеристик демпфированных систем с вязким, гистерезисным и смешанным видами демпфирования.

Ключевые слова: колебания, демпфирование, расчет, затухание, резонанс, гаситель

Для цитирования: Грневич К.М., Кокарева А.В., Уздин А.М., Нестерова О.П. Некоторые особенности учета демпфирования для расчета гармонических колебаний линейных систем // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 4. С. 24–29.

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-24-29](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-24-29)

Theoretical and experimental studies

Some features of taking damping into account in calculating harmonic oscillations of linear systems

Grenevich Ksenia M.¹, Kokareva Anna V.², Uzdin Alexander M.³, Nesterova Olga P.⁴

^{1, 2, 3} Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

Saint Petersburg, Russian Federation

⁴ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The problem of calculating harmonic oscillations of a linear damped system with inhomogeneous damping is considered. Along with the solution available in literature, which

@ К.М. Grenevich, A.V. Kokareva, A.M. Uzdin, O.P. Nesterova, 2023

requires the inversion of the matrix that determines the eigenvalues of the undamped system, the authors propose a new solution that does not require the inversion of the above mentioned matrix, but requires the inversion of the system damping matrix. The cases of hysteretic, viscous and mixed damping are considered. It is shown that the known solution gives an error near the resonance. At the resonance point, the result is not defined at all, and near the resonance it may be incorrect. An example of building the amplitude-frequency characteristic of a system with two mass tuned dynamic dampers and three peaks in the amplitude-frequency characteristic is given. The proposed formulas for calculating displacements are convenient for constructing the amplitude-frequency characteristics of damped systems with viscous, hysteretic and mixed types of damping.

Keywords: vibrations, damping, calculation, attenuation, resonance, extinguisher

For citation: Grenevich K.M., Kokareva A.V., Uzdin A.M., Nesterova O.P. Some features of taking damping into account in calculating harmonic oscillations of linear systems. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 4, pp. 24–29. [In Russian]

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-24-29](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-24-29)

Введение

Расчет гармонических колебаний линейных систем хорошо изучен и, казалось бы, не должен вызывать вопросов. Тем не менее, при конкретных расчетах такие вопросы возникают. Они связаны со сложной природой демпфирования современных конструкций, в которых применяются специальные системы гашения колебаний. В результате приходится одновременно учитывать внутреннее трение в материале и затухание в специальных демпферах, которое при затухании менее 20% от критического, хорошо описывается вязким частотно-зависимым затуханием [1–3].

Уравнение движения при гистерезисном демпфировании по Е.С. Сорокину, как известно, имеет вид:

$$M\ddot{q} + B_c\dot{q} + Rq = P \sin \omega t, \quad (1)$$

где B_c – матрица гистерезисного демпфирования;

M – матрица инерции системы;

R – матрица жесткости;

P – вектор обобщенных сил;

ω – частота возмущения;

q – вектор перемещений обобщенных масс;

\tilde{q} – вектор комплексно-сопряженный к q по Е.С. Сорокину [1, 4].

Матрица B_c строится с использованием обобщенной гипотезы Е.С. Сорокина по тем же формулам, что и матрица жесткости R при замене модуля упругости каждого элемента E на произведение $\gamma \cdot E$, где γ – коэффициент неупругого сопротивления в материале.

При расчете строительных конструкций часто матрицу Сорокина заменяют на матрицу эквивалентного вязкого демпфирования. Для этого используют несколько способов. Наиболее простой способ – использовать формулу:

$$B_e = B_c \cdot X \cdot K^{-1} \cdot X^{-1}, \quad (2)$$

где X – матрица собственных векторов недемпфированной системы;

K^2 – диагональная матрица собственных чисел матрицы $M^{-1}R$.

Использование формулы (2) равносильно гипотезе о распределении потерь энергии, пропорциональной энергии форм колебаний. Такой подход использован во многих программах, например в программе MIDAS или ANSYS.

После приближенной замены гистерезисного демпфирования эквивалентным вязким, уравнение (2) принимает вид:

$$M\ddot{q} + B_e\dot{q} + Rq = P \sin \omega t \quad (3)$$

Если преобразование гистерезисного демпфирования к вязкому виду приводит к большим погрешностям, то в системе присутствуют оба вида демпфирования:

$$M\ddot{q} + B_c\dot{q} + B_v\dot{q} + Rq = P \sin \omega t \quad (4)$$

Решение этих уравнений ищется стандартным способом в виде суммы:

$$q = S \sin \omega t + C \cos \omega t \quad (5)$$

После подстановки (5) в (4) и приравнивания членов при косинусе и синусе, получаем известную систему линейных уравнений, которая для общего случая при учете гистерезисного и вязкого демпфирования имеет вид:

$$\begin{cases} -M \cdot S \cdot \omega^2 + B_v \cdot C \cdot \omega - B_c \cdot C + R \cdot S = P \\ -M \cdot C \cdot \omega^2 + B_v \cdot S \cdot \omega - B_c \cdot S + R \cdot C = 0 \end{cases} \quad (6)$$

В литературе [1,4] широко известно решение этой системы, которое при учете только вязкого демпфирования имеет следующей вид:

$$S(\omega) = (\omega^2 \cdot B_e \cdot (R - A \cdot \omega^2)^{-1} \cdot B_e + (R - A \cdot \omega^2)^{-1} \cdot P \quad (7)$$

$$C(\omega) = -(R - A \cdot \omega^2)^{-1} \cdot B_e \cdot \omega \cdot S(\omega) \quad (8)$$

Авторы этого решения при его получении старались не обращать матрицу демпфирования B_3 . Это было связано с тем, что матрица гистерезисного демпфирования включает относительно малые члены по сравнению со специальным демпфированием в системах сейсмогашения и внутренним трением в конструкции, которыми можно пренебречь. А матрица вязкого демпфирования B_3 во многих случаях является особенной. В результате решение, требующее обращения матрицы B_3 , не использовалось. Аналогичная ситуация возникает, когда в задачах взаимодействия сооружения с основанием пренебрегают затуханием в грунте, учитывая только демпфирующую границу, хотя, по нашему мнению, такой подход не всегда приемлем.

Наряду с решением (7), (8) можно получить и другую форму решений, которая записывается следующим образом:

$$C(\omega) = \left(\frac{1}{\omega} \cdot (A \cdot \omega^2 - R) \cdot B_e^{-1} \cdot (A \cdot \omega^2 - R) + B_e \cdot \omega\right)^{-1} \cdot P \quad (9)$$

$$S(\omega) = \left(\frac{1}{\omega} \cdot B_e^{-1} \cdot (A \cdot \omega^2 - R) \cdot C(\omega) \quad (10)$$

При этом для обеих форм решений амплитуды колебаний вычисляются по формуле:

$$A = \sqrt{S(\omega)^2 + C(\omega)^2} \quad (11)$$

Хотя обе формы решения приводят к одним результатам, вычислительный процесс по ним существенно различается.

Во второй форме решения возникает необходимость обращения матрицы суммарного вязкого демпфирования, которую можно получить следующим образом:

$$\mathbf{B}_s = \mathbf{B}_c + \mathbf{B}_v \omega \quad (12)$$

В случае, когда нет резонанса, оба решения дают одинаковые результаты, если матрица демпфирования не особенная и допускает обращение. Но при резонансе матрица $(\mathbf{R} - A\omega^2)$ является особенной и ее невозможно обратить. При расчетах вблизи резонансов появляются большие потери точности. Резонансная амплитуда получается неверной. В связи с этим, данный вариант решения не применим.

В качестве примера рассмотрим АЧХ двухмассового динамического гасителя колебаний. Схема конструкции представлена на рисунке 1.

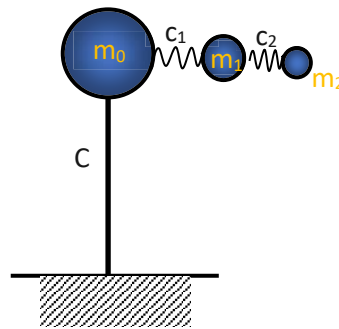


Рисунок 1 – Схема двухмассового динамического гасителя колебаний. С – коэффициент жесткости упругих элементов, m – масса элемента

Figure 1 – Diagram of a two-mass dynamic vibration damper. C is the stiffness coefficient of elastic elements, m is the mass of the element

Матрицы инерции, жесткости и вектор обобщенных перемещений для данной системы имеют вид:

$$\mathbf{M} = [1 \quad v_1 \quad v_2], \text{ где } v_1 = \frac{m_1}{m_0}, v_2 = \frac{m_2}{m_0}; \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} C + c_1 & -c_1 & 0 \\ -c_2 & c_1 + c_2 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 \\ m_1 \\ m_2 \end{bmatrix}.$$

Расчеты по указанным формулам (7), (8) и (9), (10) приведены на рисунке 2 (а, б).

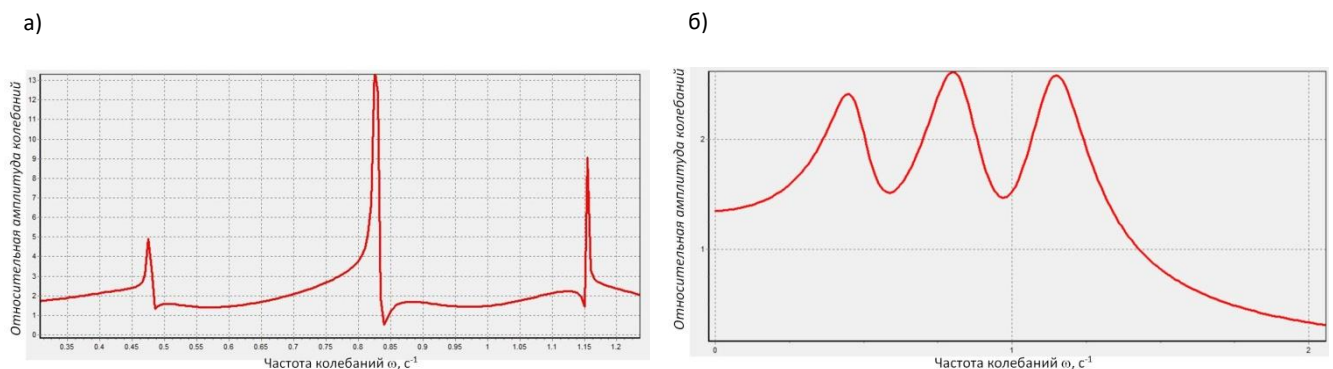


Рисунок 2 – а) АЧХ при использовании формул (7), (8); б) АЧХ при использовании формул (9), (10)

Figure 2 – a) Frequency response when using formulas (7), (8); b) Frequency response when using formulas (9), (10)

На рисунке 2а в точках при частоте возмущения равной 0,47, 0,83 и 1,15 проявляются ошибки, возникающие при обращении матрицы ($\mathbf{R}-\mathbf{A}\omega^2$), определитель которой близок к нулю. А при использовании предложенной формы записи, АЧХ принимает правильный вид (рис. 2б).

Выводы

При расчетах гармонических колебаний, в частности при построении АЧХ, следует аккуратно учитывать затухание в системах и демпферах, и пользоваться формой решений, где нет обращения матрицы ($\mathbf{R}-\mathbf{A}\omega^2$).

Список литературы

1. Белаш Т.А., Уздин А.М. Энергопоглощение в системах сейсмозащиты зданий и сооружений. Монография. Санкт-Петербург: ПГУПС. 2020. 178 с.
2. Durseneva N.V., Indeykin A.V., Kuznetsova I.O., Uzdin A.M., Fedorova M. Yu. Peculiarities of Calculating Bridges with Seismic Isolation Including Spherical Bearings and Hydraulic Dampers in Russia. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. Volume 9, number 4, April, 2015, pp. 401–409.
3. Skiner R.I., Robinson W.H., McVerry G.H. An introduction to seismic isolation. New Zealand. John Wiley & Sons.1993, 353 p.
4. Долгая А.А., Индейкин А.В., Уздин А.М. Теория диссипативных систем. Санкт-Петербург: ПГУПС. 1999. 99 с.

References

1. Belash T.A., Uzdin A.M. Energopogloshchenie v sistemah sejsmozashchity zdaniy i sooruzhenij. Monografiya. Saint Petersburg: PGUPS. 2020, 178 p. [In Russian]
2. Durseneva N.V., Indeykin A.V., Kuznetsova I.O., Uzdin A.M., Fedorova M.Yu. Peculiarities of Calculating Bridges with Seismic Isolation Including Spherical Bearings and Hydraulic Dampers in Russia. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. Volume 9, number 4, April, 2015, pp. 401–409.
3. Skiner R.I., Robinson W.H., McVerry G.H. An introduction to seismic isolation. New Zealand. John Wiley & Sons.1993, 353 p.
4. Dolgaya A.A., Indejkin A.V., Uzdin A.M. Teoriya dissipativnyh sistem. Saint Petersburg: PGUPS. 1999. 99 p. [In Russian]

Информация об авторах /Information about authors

Грневич Ксения Михайловна, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Кафедра «Строительные конструкции, здания и сооружения», студент.

Санкт-Петербург, Российская Федерация

kсениа.кс@yandex.ru

Kseniya M. Grenevich, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), Department of building constructions, buildings and structures, student.

Saint Petersburg, Russian Federation

kсениа.кс@yandex.ru

Кокарева Анна Владимировна, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Кафедра «Строительные конструкции, здания и сооружения», студент.

Санкт-Петербург, Российская Федерация

annakrv8@gmail.com

Anna V. Kokareva, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), Department of building constructions, buildings and structures, Student.

Saint Petersburg, Russian Federation

annakrv8@gmail.com

Уздин Александр Моисеевич, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), Кафедра «Механика и прочность материалов и конструкций», доктор технических наук, профессор.

Санкт-Петербург, Российская Федерация

uzdin@mail.ru

Alexander M. Uzdin

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS), Department of Mechanics and strength of materials and structures, Dr. Sci. (Engineering), Professor.

Saint Petersburg, Russian Federation

uzdin@mail.ru

Нестерова Ольга Павловна, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), Кафедра «Строительная механика», кандидат технических наук, доцент.

Санкт-Петербург, Российская Федерация.

neona@mail.ru

Olga P. Nesterova, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Department of Structural mechanics, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering).

Saint Petersburg, Russian Federation

neona@mail.ru

УДК 624.046.5

DOI: [10.37153/2618-9283-2023-4-30-44](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-30-44)

Теоретические и экспериментальные исследования

Оценка индекса надежности стержней ферм при интервальной неопределенности исходных данных

**Соловьев Сергей Александрович¹, Иньков Александр Эдуардович¹,
Соловьева Анастасия Андреевна¹**

¹Вологодский государственный университет. Вологда, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлен подход к оценке индекса надежности стержней стальных ферм при неопределенности случайных величин, выраженной в наличии информации лишь о границах изменчивости. Представлены различные способы оценки границ изменчивости случайных величин, а также предложен новый подход с использованием положений теории возможностей и неравенства Дворецкого-Кифера-Вольфовица (ДКВ). Индекс надежности позволяет сравнивать различные проектные решения по критерию безопасности, выявлять элементы конструкций с наибольшей вероятностью отказа для мониторинга технического состояния, а также позволяют получить количественную оценку повышения уровня безопасности при усилении элементов строительных конструкций. Данные статистического моделирования методом Монте-Карло отражают аналогию индекса надежности в рассматриваемом подходе с вероятностью безотказной работы элемента фермы.

Ключевые слова: надежность, неопределенность, ферма, индекс надежности, безопасность, интервал, безвероятностный подход, риск

Для цитирования: Соловьев С.А., Иньков А.Э., Соловьева А.А. Оценка индекса надежности стержней ферм при интервальной неопределенности исходных данных // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 4. С. 30–44.

DOI: [10.37153/2618-9283-2023-4-30-44](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-30-44)

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-79-01035, <https://rscf.ru/project/23-79-01035/>

Theoretical and experimental studies

The reliability index estimation of truss rods with interval uncertainty of the initial data

Sergey A. Solovev¹, Alexander E. Inkov¹, Anastasia A. Soloveva¹

¹Vologda State University (VSU). Vologda, Russian Federation

Abstract. The article presents an approach to evaluation the reliability index of steel truss bars with the uncertainty of random variables expressed in the presence of information only about the bounds of variability. Different methods of estimating the bounds of variability for random variables are presented. The new approach is also developed using the provisions of the theory of possibility and the Dvoretzky–Kiefer–Wolfowitz inequality (DKW). The reliability index allows

@ Соловьев С. А., Иньков А. Э., Соловьева А. А., 2023

to compare various design solutions by the safety criterion, identify structural elements with the highest failure probability for monitoring the technical state and to quantify the increase in the safety level with strengthening of structural elements. The Monte Carlo statistical simulation data reflect the analogy of the non-probabilistic reliability index in the considered approach with the non-failure probability of the truss bar.

Keywords: reliability, uncertainty, truss, reliability index, safety, interval, non-probabilistic approach, risk

For citation: Solovev S.A., Inkov A.E., Soloveva A.A. The reliability index estimation of truss rods with interval uncertainty of initial data. *Earthquake engineering. Construction safety*. 2023, no. 4, pp. 30–44. (In Russian)

DOI: [10.37153/2618-9283-2023-4-30-44](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-30-44)

Funding: The research was funded by Russian Science Foundation (RSF) No. 23-79-01035. <https://rscf.ru/en/project/23-79-01035/>

Введение

Надежность строительного объекта – это его способность выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации. В то же время в Eurocode 0 «Basis of structural design» отмечается, что «...надежность обычно выражается в вероятностных терминах». В настоящее время в РФ основным условием надежности строительных объектов является выполнение требований (критериев) для всех учитываемых предельных состояний при действии наиболее неблагоприятных сочетаний расчетных нагрузок в течение расчетного срока службы. Такой подход является основой метода предельных состояний. Как отмечает д.т.н., профессор О.В. Мкртычев: «Метод предельных состояний позволяет обеспечить необходимый уровень надежности зданий и сооружений, что подтверждается опытом проектирования, строительства и эксплуатации. Однако данный метод имеет ряд недостатков, например, невозможно сказать, какой уровень надежности в количественном измерении формируется в результате применения норм проектирования, одинаков ли этот уровень надежности для зданий и сооружений различных конструктивных схем и выполненных из различных материалов» [1].

Развитием метода предельных состояний, который иначе называется «полувероятностный подход», является полный вероятностный расчет на заданный индекс надежности или вероятность отказа. Количественная оценка уровня безопасности в виде индекса надежности или вероятности безотказной работы позволяет эффективно решать следующие задачи: сравнение проектных решений по критерию безопасности; выбор наименее надежного элемента сооружения для мониторинга технического состояния; оценка эффективности усиления строительных конструкций по критерию повышения уровня надежности и многие другие.

Для вероятностного анализа надежности необходима полная статистическая информация о случайных величинах в математической модели предельных состояний (вид распределения вероятностей, параметры распределения вероятностей, данные о зависимости/независимости случайных величин и др.). Как отмечено в ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований», использование вероятностно-статистических методов допускается при наличии достаточных данных об изменчивости основных параметров в случае, если количество (длина ряда) данных позволяет проводить их статистический анализ (в частности, эти данные должны быть однородными и статистически независимыми). Получение таких данных в практических задачах анализа надежности строительных конструкций может быть затруднительным. Так в [2]

отмечается, что «В настоящее время во многих работах публикуются экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что распределения реально наблюдаемых случайных величин в подавляющем большинстве случаев отличны от нормального распределения. Да и в целом, по мнению многих исследователей, применение методов математической статистики некорректно, так как невозможно на практике с помощью реальных экспериментальных установок проверить достоверность полученных с их помощью результатов. То есть в рамках данного подхода мы имеем, что понятия генеральной совокупности, доверительного интервала для неизвестного среднего случайной величины, ошибки первого и второго рода при проверке гипотез и прочие – это «неверифицируемые» характеристики. Все эти и многие другие обстоятельства привели к появлению нестатистического подхода».

Например, в [3] отмечается, что «Во многих случаях при использовании вероятностной модели для анализа практических проблем неопределенности приходится делать предположения о распределении вероятностей для параметров. Однако существуют исследования, указывающие на то, что даже небольшое отклонение параметров распределения от реальных значений может привести к очень большой ошибке анализа надежности. С другой стороны, благодаря обширной инженерной практике было установлено, что, хотя очень трудно получить точные распределения вероятностей для случайных параметров, когда выборки недостаточны по объему или низкого качества, как правило, нетрудно получить интервалы их изменения на основе ограниченных данных и инженерного опыта. Например, при анализе обработки листового металла трудно получить распределение вероятности коэффициента трения между пресс-формой и листом из-за сложности моделирования смазочной среды; однако, основываясь на имеющемся опыте, можно утверждать, что такой коэффициент трения лежит в интервале $[0,1 \dots 0,2]$ ».

Концепция оценки надежности, когда в качестве альтернативы вероятностным параметрам используется информация о границах изменчивости случайных величин, получила название безвероятностного (non-probabilistic) подхода к анализу надежности. Одними из основателей безвероятностного подхода к анализу надежности технических систем являются Яков Бен-Хаим (Yakov Ben-Haim) и Исаак Элишаков (Isaac Elishakoff). В своей фундаментальной работе «Convex models of uncertainty in applied mechanics» [4] они формулируют преимущества новой концепции перед традиционным вероятностно-статистическим подходом к анализу надежности. В исследовании [4] отмечается, что вероятность не является единственной отправной точкой для количественной оценки идеи надежности. Вероятностная надежность подчеркивает вероятность приемлемого функционирования системы. Безвероятностная надежность, как она предложена в концепции [4], подчеркивает диапазон приемлемого состояния функционирования технической системы. В вероятностных терминах система является надежной, если вероятность отказа системы достаточно мала. В безвероятностной формулировке надежности, техническая система является надежной, если диапазон колебаний функции предельного состояния приемлемо мал. Обе концепции обеспечения надежности связаны с проблемой неопределенности данных. В обоих методах проектные случайные величины рассматриваются как параметры управления неопределенности предельного состояния. При вероятностной концепции надежности проектные решения должны снижать вероятность отказа до приемлемого уровня. В случае безвероятностной концепции надежности, система или конструкция должна иметь обеспеченность того, что функция предельного состояния остается в границах приемлемой области.

Вероятностные методы или методы теории нечетких множеств требуют наличия функции распределения вероятностей или функции принадлежности для количественной оценки надежности. Как отмечают авторы в [5], «Архимед говорил: «Дайте мне точку опоры, и я переверну землю». В отличие от этого утверждения, аналитик, основывающийся

свои расчеты на вероятностных методах или нечетких множествах, по сути, произносит: «Дайте мне плотность распределения вероятностей или функцию принадлежности величин, и я оценю безопасность конструкции».

Индекс надежности в вероятностной концепции обозначается β и отражает связь с вероятностью отказа через функцию Лапласа. Индекс надежности в безвероятностной концепции обозначается η . Существуют различные способы его интерпретации [6–9]. В отдельных интерпретациях он отождествляется с вероятностью безотказной работы [4] с условием $\eta \in [0; 1]$. В других [7–9], он является индикатором удаленности поверхности предельного состояния от начала координат системы и может принимать значения $\eta \in [0; \infty]$ или $\eta \in [-\infty; \infty]$. В связи с относительной новизной данной концепции анализа надежности, вопросы исследования данного показателя надежности и его нормирования еще остаются открытыми.

Задачи исследования

В настоящей работе предлагается исследовать подходы к оценке границ изменчивости случайных величин в виде интервала при анализе надежности элементов строительных конструкций, а также разработать новый подход к оценке данного интервала на основе теории возможностей и теории нечетких множеств. На основе методик по оценке границ изменчивости случайных величин предлагается рассмотреть алгоритмы оценки индекса надежности стержней фермы по имеющейся статистической информации.

Методы исследования

Рассмотрим имеющиеся подходы к построению границ изменчивости случайных величин. При принятии гипотезы о нормальном распределении случайной величины, для построения границ изменчивости может быть использовано «правило трех сигм» или правило «68–95–99.7» [10]. Правило трех сигм выражает традиционную эвристику, согласно которой почти все значения принимаются лежащими в пределах трех стандартных отклонений от среднего, и поэтому эмпирически можно рассматривать вероятность 99,7% как практически достоверную. Поэтому для случайной величины X может быть записано следующее выражение:

$$X \in [x^l; x^u] = [m_x - 3 \cdot S_x; m_x + 3 \cdot S_x], \quad (1)$$

где m_x – математическое ожидание случайной величины X ; S_x – стандартное (среднеквадратическое) отклонение случайной величины X ;

В практических задачах следует иметь в виду, что математическое ожидание и стандартное отклонение выражаются в виде доверительных интервалов генеральной совокупности данных по выборочной совокупности. Таким образом, в неравенстве (1) выбирается комбинация интервальных параметров, создающая наиболее широкий интервал значений для случайной величины X .

Также следует учитывать, что выражение (1) справедливо для нормального закона распределения. Как было отмечено выше, в условиях ограниченной статистической информации не всегда можно достоверно выявить принадлежность выборки к конкретному закону распределения. В таких случаях для оценки границ изменчивости случайной величины может быть использовано неравенство Высочанского-Петунина:

$$\Pr(|X - m_x| \geq \lambda S_x) = \frac{4}{9\lambda^2}, \quad (2)$$

где λ – любое положительное число с условием $\lambda > \sqrt{\frac{8}{3}}$.

Преимуществом такого подхода является то, что данное неравенство справедливо в том числе и для резко асимметричных распределений, тем самым устанавливая границы для множества значений случайной величины, попадающих в определённый интервал.

Границы изменчивости случайной величины могут быть получены следующим образом: аналитически (3) или графически устанавливается значение параметра λ для принятой доверительной вероятности; границы случайной величины вычисляются по формуле: $[\underline{x}; \bar{x}] = [m_x - \lambda S_x; m_x + \lambda S_x]$. Параметры m_x и S_x также приведены для генеральной совокупности, поэтому в практических задачах используются их оценки в виде доверительных интервалов.

Рассмотрим еще один подход к назначению границ изменчивости случайной величины. Одним из подходов к анализу надежности элементов строительных конструкций при неполной статистической информации является использование положений теории возможностей и теории нечетких множеств. Так в [9] предложены треугольные функции принадлежности, на основе которых строятся две граничные функции распределения нечеткой переменной. Данные функции имеют аналитический вид:

$$\underline{\pi}_X(x) = \frac{x(1-\alpha) + a_x\alpha - X_{\min}}{a_x - X_{\min}} \quad \text{при } x \in [X_{\min}; a_x], \quad (3)$$

$$\bar{\pi}_X(x) = \frac{X_{\max} - x(1-\alpha) - a_x\alpha}{X_{\max} - a_x} \quad \text{при } x \in [a_x; X_{\max}], \quad (4)$$

где X_{\min} и X_{\max} – минимальное и максимальное значение из подмножества данных; $a_x = 0,5 \cdot (X_{\max} + X_{\min})$ – параметр центра распределения; $\alpha \in [0; 1]$ – уровень среза (риска).

Нижняя граница интервала случайной величины может быть получена из условия $\underline{\pi}_X(x^l) = 0$, а верхняя граница из условия $\bar{\pi}_X(x^u) = 0$.

Субъективным параметром в таком подходе является уровень среза α , которым необходимо задаваться. Для его назначения может быть использован следующий подход: вначале строится эмпирическая функция распределения случайной величины $F_{emp,X}(x)$ по имеющимся статистическим данным. Затем на основе неравенства Дворецкого-Кифера-Вольфовица (ДКВ) [12] или статистики Колмогорова-Смирнова строятся две граничные эмпирические функции распределения, которые формируют область (рис. 1), внутри которой находится действительная функция распределения случайной величины X . На основе неравенства ДКВ (5) могут быть получены границы действительного распределения вероятностей в виде:

$$\underline{F}_{DKW,X}(x) = F_{emp,X}(x) - \varepsilon \leq F(x) \leq \bar{F}_{DKW,X}(x) = F_{emp,X}(x) + \varepsilon, \quad (5)$$

где $\varepsilon = \sqrt{\frac{\ln \frac{2}{\alpha}}{2n}}$; α – доверительная вероятность; n – число испытаний/измерений.

На основе неравенства (5) можно утверждать, что действительная функция распределения вероятностей $F(x)$, будет находиться в указанном интервале с вероятностью $1-\alpha$.

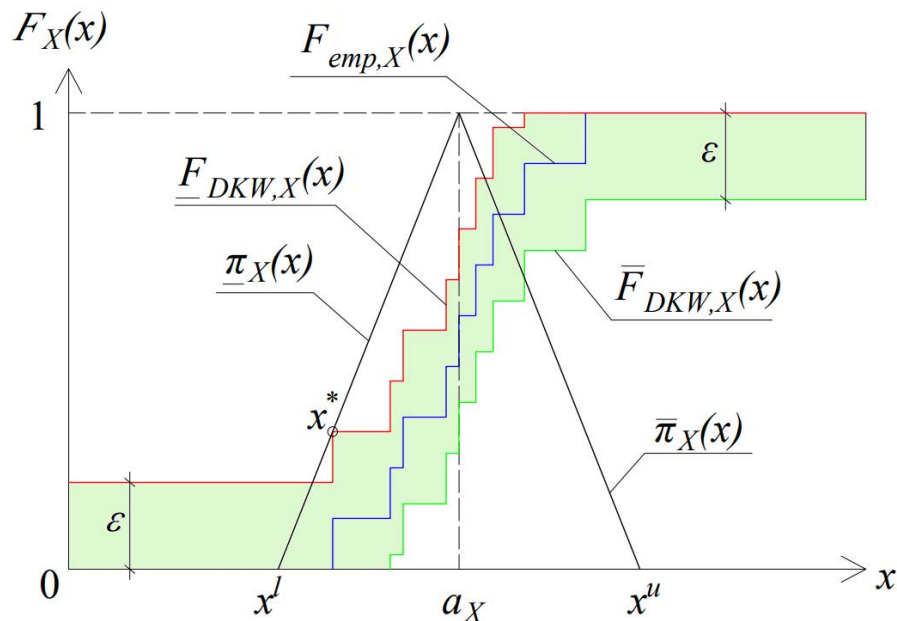


Рисунок 1 – Способ назначения уровня среза (риска) α для оценки границ изменчивости случайной величины

Figure 1– The method for assigning the cut-level (risk level) α for estimating the bounds of variability of a random variable

После построения граничных функций распределения $\underline{F}_{DKW,X}(x)$ и $\overline{F}_{DKW,X}(x)$, подбирается такое значение α , чтобы функция $\pi_X(x)$ касалась функции $\underline{F}_{DKW,X}(x)$ в точке x^* , которая соответствует первому «скачку» функции $\underline{F}_{DKW,X}(x)$. Далее, при подобранном значении уровня среза α , по функциям (3)-(4) или графически вычисляются границы изменчивости случайной величины X в виде интервала $X \in [x^l; x^u]$.

В [13] предлагается следующий подход к оценке границ изменчивости случайной величины:

$$x^l = x_{\min} - \frac{1}{2N-2}(x_{\max} - x_{\min}), \quad x^u = x_{\max} + \frac{1}{2N-2}(x_{\max} - x_{\min}),$$

где $x_{\max} = \max_{1 \leq N \leq j} (x_j)$, $x_{\min} = \min_{1 \leq N \leq j} (x_j)$, N – число испытаний/измерений.

Помимо статистического анализа имеющихся данных, границы интервала изменчивости случайной величины могут быть получены исходя из производственных или нормативных допусков. Например, затруднительно выявить функцию распределения изменчивости геометрических параметров поперечного сечения профилей стального проката. Большую роль здесь играет оборудование, на котором производятся профили, а также развитие системы внутреннего контроля качества на предприятии. Однако имеются допуски на толщину проката и размеры поперечного сечения выпускаемой продукции. На основе этих данных можно установить предельные граничные площади, моменты сопротивления и инерции для проката.

После того, как все случайные величины в математической модели предельного состояния представлены в виде интервалов, характеризующих границы их изменчивости, можно выполнять анализ надежности элемента по заданному критерию предельного состояния.

Рассмотрим математическую модель предельного состояния в общем виде с двумя случайными величинами $\tilde{x} \leq \tilde{y}$, где \tilde{x} – нагрузка на элемент; \tilde{y} – несущая способность элемента. Как было отмечено выше, данные параметры можно представить в интервальной форме: $\tilde{x} \in [x^l; x^u]$, $\tilde{y} \in [y^l; y^u]$. Интервальные случайные величины, в соответствии с правилами интервальной арифметики [14], имеют следующие статистические характеристики: центр $x^c = \frac{x^u + x^l}{2}$, радиус $x^r = \frac{x^u - x^l}{2}$, аналогично для \tilde{y} .

Случайная величина также может быть представлена в нормализованной форме в виде [15]: $x = x^c + \delta_x x^r$, где $\delta_x \in [-1; +1]$.

Функция предельного состояния g для рассматриваемой модели может быть выражена как $\tilde{g} = \tilde{y} - \tilde{x} \geq 0$. В [16] приводится выражение для вычисления индекса надежности при интервальном подходе:

$$\eta = \eta(\tilde{g} > 0) = \frac{g^c}{g^r}, \quad (6)$$

где g^c и g^r – параметры центра и радиуса для функции g .

В [5, 17] предложены другие подходы к оценке индекса надежности η . Индекс надежности выражается отношением отсеченной части геометрической фигуры V_{safe} , сформированной по интервальным данным, к ее общей площади, объему или гиперобъему V (рис. 2). В таком случае индекс надежности η можно соотносить с вероятностью отказа.

В этом случае необходимо трансформировать математическую модель предельного состояния к случайным величинам нормализованного вида:

$$\tilde{g} = (y^c + \delta_y y^r) - (x^c + \delta_x x^r). \quad (7)$$

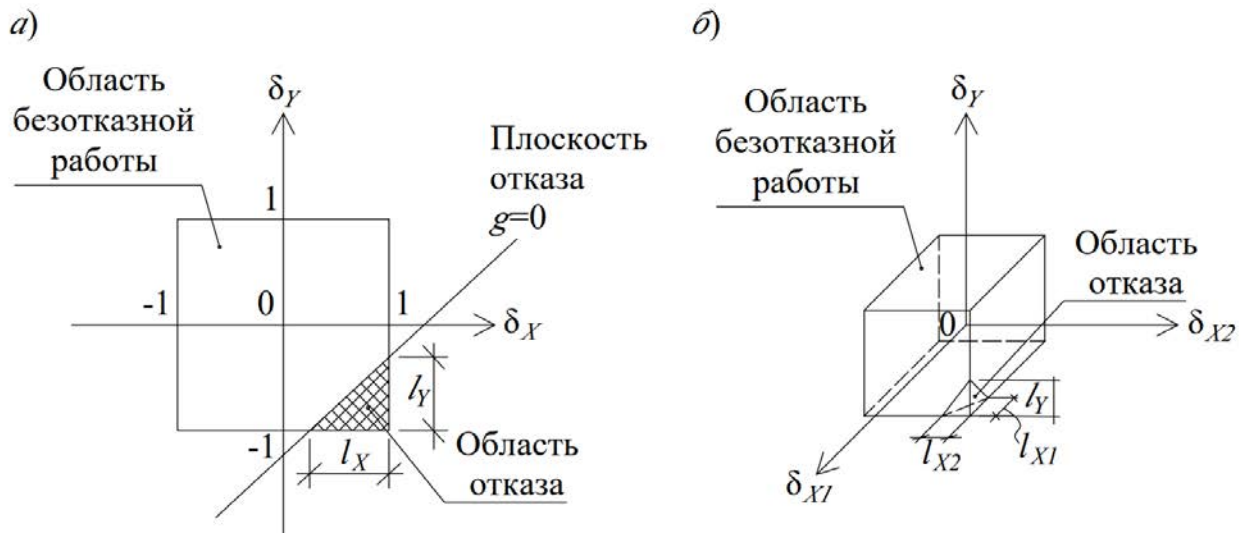


Рисунок 2 – Графический подход к определению индекса надежности η :

а) двухмерное пространство; б) трехмерное пространство

Figure 2 – Graphical approach to estimation the reliability index η : a) two-dimensional space; б) three-dimensional space

В двухмерном случае (две случайные величины, рис. 2а) индекс надежности представляет собой отношение отсеченной части прямоугольника и его полной площади:

$$\eta = \eta(\tilde{g} > 0) = \frac{V_{safe}}{V} = 1 - \frac{V_{failure}}{V} = 1 - \frac{S_{failure}}{S} = 1 - \frac{(x^u - y^l)^2}{8 \cdot x^c \cdot y^c}, \quad (8)$$

где $S_{failure} = 0,5l_x l_y = \frac{(x^u - y^l)^2}{2 \cdot x^c \cdot y^c}$ – площадь области отказа; S – общая площадь

прямоугольника, равная 4;

В трехмерном случае (три случайные величины, рис. 2б), например, для математической модели вида $\tilde{g} = (y^c + \delta_Y y^r) - (x_1^c + \delta_{X1} x_1^r) - (x_2^c + \delta_{X2} x_2^r)$, индекс надежности представляет собой отношение отсеченной части куба и его полному объему:

$$\eta = \eta(\tilde{g} > 0) = \frac{V_{safe}}{V} = 1 - \frac{V_{failure}}{V} = 1 - \frac{(x_1^u + x_2^u - y^l)^3}{48 \cdot x_1^c \cdot x_2^c \cdot y^c}, \quad (9)$$

где $V_{failure} = \frac{1}{6} l_{x1} \cdot l_{x2} \cdot l_y = \frac{(x_1^u + x_2^u - y^l)^3}{6 \cdot x_1^c \cdot x_2^c \cdot y^c}$ – объем отсеченной пирамиды.

На основе вышеописанного алгоритма, в [6] предложена следующая зависимость для оценки индекса надежности при интервальной оценке случайных величин для любой линейной математической модели предельного состояния:

$$\eta(g > 0) = 1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^u - \sum_{j=1}^m y_j^l \right)^{m+n}}{(m+n)! \cdot 2^{m+n} \cdot \prod_{i=1}^m x_i^c \prod_{j=1}^n y_j^c}, \quad (10)$$

где n – число случайных величин условной «нагрузки»; m – число случайных величин условной «несущей способности».

Отмечается [6], что уравнение (10) дает точное решение для математических моделей предельных состояний близких к линейным. Также следует отметить, что данные модели работают при малых вероятностях отказа, что встречается в подавляющем большинстве задач строительной практики. При больших значениях вероятности отказа, необходимо уточнять отношение областей отказа к общему объему фигур.

Результаты исследования

Пусть требуется выполнить оценку индекса надежности элементов фермы с расчетной схемой по рис. 3.

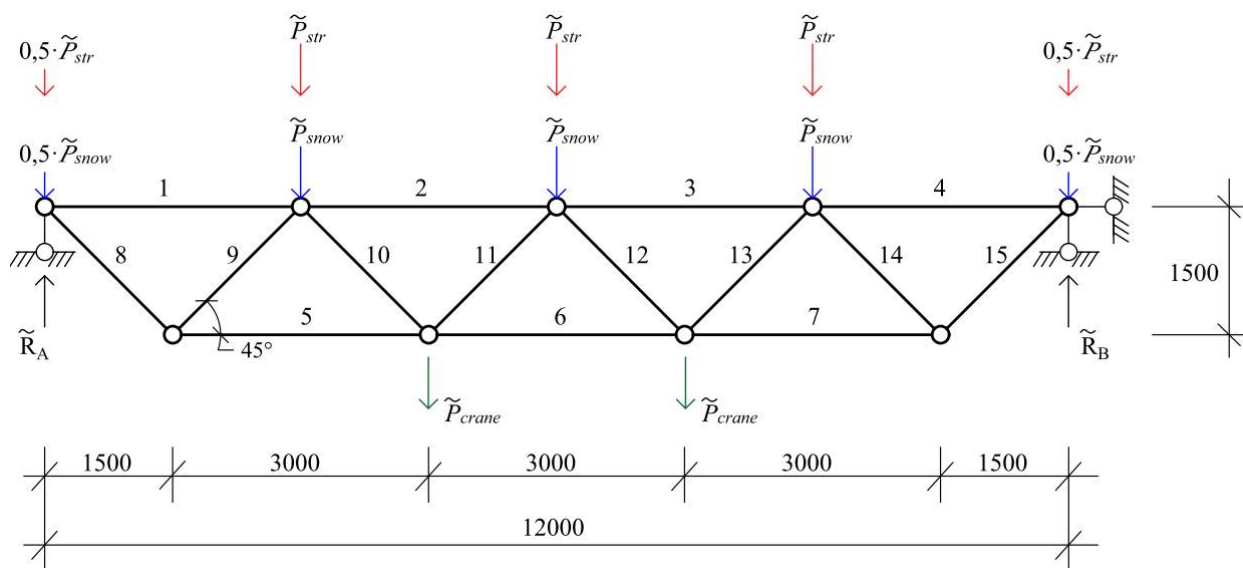


Рисунок 3 – Расчетная схема фермы со случайной нагрузкой

Figure 3 – Design scheme of the truss with random load

На ферму действуют нагрузки от веса конструкций покрытия \tilde{P}_{str} , вес снегового покрова \tilde{P}_{snow} , крановая нагрузка \tilde{P}_{crane} .

Рассмотрим пример оценки индекса надежности стержня 6 фермы по критерию прочности стали. Математическую модель предельного состояния можно записать в виде:

$$\tilde{P}_{str}\psi_{str} + \tilde{P}_{snow}\psi_{snow} + \tilde{P}_{crane}\psi_{crane} + \tilde{N}_{6,s-w} \leq \tilde{N}_{ult} = \tilde{\sigma}_{s,ult} \cdot \tilde{A}_6, \quad (11)$$

где $\tilde{N}_{6,s-w}$ – усилие в стержне 6 фермы от собственного веса фермы; ψ_i – геометрические коэффициенты фермы для определения усилий через нагрузки на ферму [18].

Усилие в стержне 6 фермы от собственного веса фермы определяется в интервальной форме следующим образом: для каждого профиля стержня фермы устанавливаются возможные границы изменчивости площади $\tilde{A}_{i-j} = [A_{i-j}^l; A_{i-j}^u]$ в соответствии с нормативной документацией и допусками. Затем на ферму задаются нагрузки от собственного веса стержней фермы в двух вариантах: минимальные $q_{i-k,s-w}^l = A_{i-j}^l \cdot \rho_s^l$ и максимальные $q_{i-k,s-w}^u = A_{i-j}^u \cdot \rho_s^u$, где ρ_s^l и ρ_s^u – минимальная и максимальная плотность стали в соответствии с данными сертификатов на сталь. После чего вычисляют интервал значений усилия в стержне от собственного веса $\tilde{N}_{6,s-w} \in [N_{6,s-w}^l; N_{6,s-w}^u]$ в прикладном программно-вычислительном комплексе.

Коэффициенты ψ_i вычисляются путем расчета усилий в стержне фермы от i -го вида нагрузки с заменой значения нагрузки \tilde{P}_i на единицу. Так для стержня 6 фермы с расчетной схемой по рис. 3 $\psi_{str} = \psi_{snow} = 4$ и $\psi_{crane} = 3$.

В соответствии с правилами интервальной арифметики [14], границы случайной величины \tilde{N}_{ult} могут быть найдены (с учетом того, что прочность стали и площадь поперечного сечения не могут быть отрицательными) как $\tilde{N}_{ult} \in [\sigma_{s,ult}^l \cdot A_6^l; \sigma_{s,ult}^u \cdot A_6^u]$.

Индекс надежности η стержня 6 фермы может быть вычислен как:

$$\eta = 1 - \frac{\left(4P_{str}^u + 4P_{snow}^u + 3P_{crane}^u + N_{6,s-w}^u - \sigma_{s,ult}^l \cdot A_6^l\right)^{1+4}}{(1+4)! \cdot 2^{1+4} \cdot 4P_{str}^c \cdot 4P_{snow}^c \cdot 3P_{crane}^c \cdot N_{6,s-w}^c \cdot \sigma_{s,ult}^c \cdot A_6^c} \quad (12)$$

Рассмотрим пример. Нагрузки, приложенные на ферму (рис. 3), приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Нагрузки на ферму

Table 1 – Truss loads

Наименование / Name	Обозначение / Designation	Нижняя граница, кН / Lower limit, kN	Верхняя граница, кН / Upper limit, kN	Центр интервала, кН / Interval center, kN
Вес конструкций / Weight of structures Nl	P_{str}	44,3	53,3	48,8
Снеговая нагрузка / Snow load	P_{snow}	6,3	52,02	29,16
Крановая нагрузка / Crane load	P_{cran}	75	85	80

Расчетные параметры фермы приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные параметры фермы

Table 2 – Design parameters for the truss

№ стержня / Bar No.	N_{s-w}^l , кН/kN	N_{s-w}^u , кН/kN	N_{s-w}^c , кН/kN	ψ_{str}	ψ_{snow}	ψ_{cran}	A^l , см ² /cm ²	A^u , см ² /cm ²	A^c , см ² /cm ²
1, 4	-2,36	-2,6	-2,48	-1,5	-1,5	-1	26,1	28,84	27,47
2, 3	-5,25	-5,8	-5,525	-3,5	-3,5	-3	26,1	28,84	27,47
5, 7	4,19	4,63	4,41	3	3	2	25,04	27,68	26,36
6	5,61	6,2	5,905	4	4	3	25,04	27,68	26,36
8, 15	3,41	3,77	3,59	$3/\sqrt{2}$	$3/\sqrt{2}$	$2/\sqrt{2}$	14,2	15,7	14,95
9, 14	-2,68	-2,96	-2,82	$-3/\sqrt{2}$	$-3/\sqrt{2}$	$-2/\sqrt{2}$	14,2	15,7	14,95
10, 13	1,54	1,7	1,62	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$	$2/\sqrt{2}$	7,21	7,97	7,59
11, 12	-0,55	-0,61	-0,58	$-1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	0	7,21	7,97	7,59
Прочность стали / steel strength - $\sigma_{ult} = [240; 270]$ МПа, $\sigma_{s,ult}^c = 255$ МПа									

Вычислим индекс надёжности для всех стержней графическим способом: плоскость отказа будет отсекал часть от объема фигуры только для 6, 10 и 13 стержней. Отношение

неотсеченных частей к общей площади прямоугольника приведено в таблице 3. Также в таблице приведен индекс надежности, вычисленный аналитически по формуле (12).

Для верификации результатов выполним численный эксперимент статистическим моделированием методом Монте-Карло. Запишем математическую модель (11) в виде:

$$\tilde{P}_{str} \psi_{str,i} + \tilde{P}_{snow} \psi_{snow,i} + \tilde{P}_{crane} \psi_{crane,i} + \tilde{N}_{i,s-w} \leq \tilde{\sigma}_{s,ult} \cdot \tilde{A}_i \quad (13)$$

Пусть рассматриваемые случайные величины имеют нормальное распределение, а границы их изменчивости получены по правилу трех сигм. Для моделирования снеговой нагрузки используется распределение Гумбеля, как наиболее распространенное в инженерном анализе надежности. Более подробно статистическое моделирование снеговой нагрузки описано в статье [18]. Для математической модели (13) выполним генерацию 10000 значений по нормальному распределению в программе PTC MathCAD (см рис. 4). Результаты приведены в таблице 3.

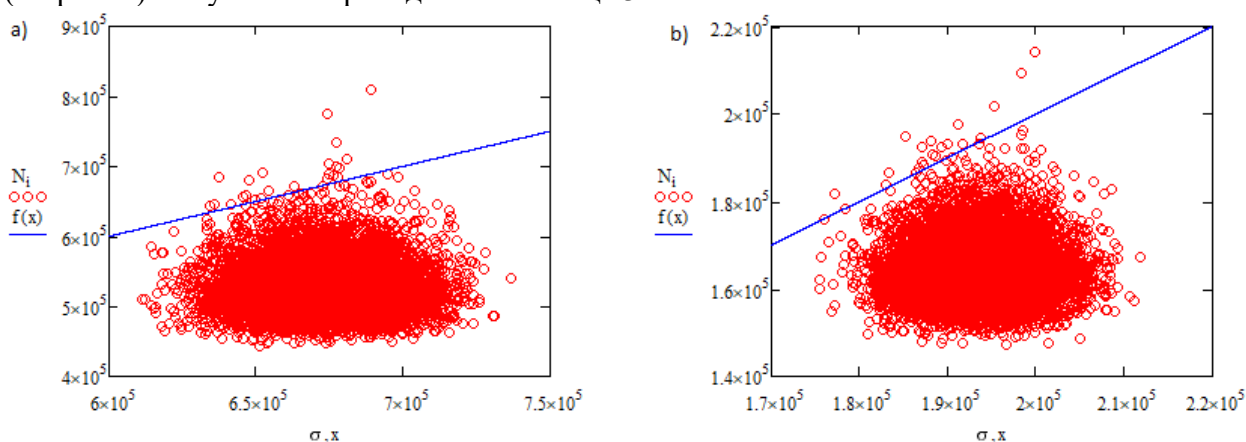


Рисунок 4 – Статистическое моделирование методом Монте-Карло:
 а) для стержня №6; б) для стержня №10

Figure 5 – Statistical Data by Monte Carlo Simulation:
 a) for bar No. 6; b) for bar No. 10

Таблица 3 – Сравнение результатов

Table 3 – Comparison of results

№ стержня Bar No.	Индекс надежности η по критерию прочности стали графический способ	Индекс надежности η по критерию прочности стали аналитический способ, по (10)	Вероятность безотказной работы в методе Монте-Карло
1, 4	1,0000	5,6870	1,0000
2, 3	1,0000	1,0000	0,9998
5, 7	1,0000	1,0007	1,0000
6	0,9587	0,9999	0,9980
8, 15	1,0000	0,9999	0,9998
9, 14	1,0000	0,9999	0,9998
10, 13	0,9465	0,9999	0,9979

11, 12	1,0000	3,3349	1,0000
--------	--------	--------	--------

В классическом вероятностном подходе надежность фермы как последовательной механической системы следует определять путем произведения вероятностей безотказной работы ее элементов $P = \prod_{i=1}^n P_i$. В рамках безвероятностного подхода предлагается определять надежность системы как отношение неотсеченной площади всеми функциями предельного состояния для всех стержней фермы к базовой площади прямоугольника (см. рис. 5). Так как угол наклона плоскости отказа для разных стержней отличается, можно вычислить надежность всей системы как отношение суммарной площади областей отказа для всех стержней фермы. В рассматриваемом случае область отказа для 10 и 13 стержня полностью включает в себя площадь отказа для 6 стержня. Таким образом, индекс надежности всей фермы как системы равен 0,94649. В рамках вероятностного подхода, произведение вероятностей для последнего столбца по таблице 3 даст результат 0,99260.

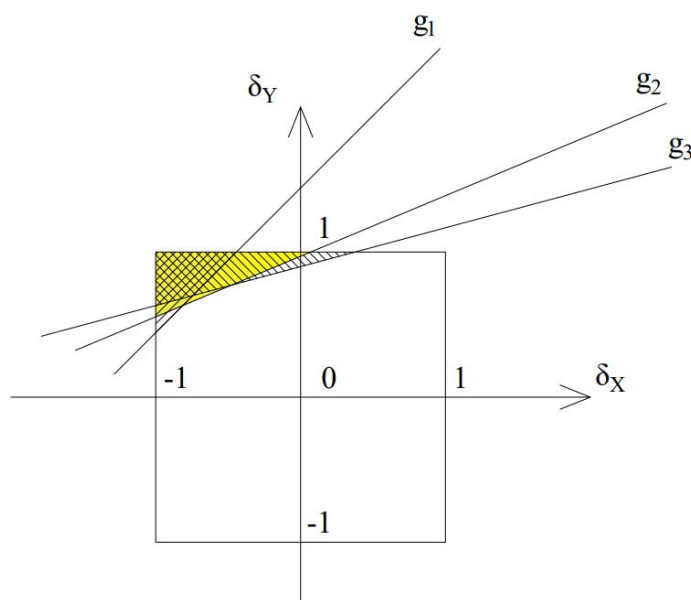


Рисунок 5 – Графическое определение индекса надежности η для системы

Figure 5 – Graphical definition of the reliability index η for a system

Таким образом, метод оценки надежности на базе интервальных оценок границ изменчивости случайных величин позволяет получить более осторожную оценку безопасности, что является актуальным при неполной статистической информации. В то же время такая может быть излишне консервативная с уменьшением алеаторной и эпистемологической неопределенности. В таком случае данный подход позволяет выявить наименее надежные фермы, которые могут быть комплексно обследованы для анализа надежности вероятностными методами для оценки безопасности эксплуатации всего сооружения. Помимо конструкционного анализа представленный подход можно использовать в других отраслях строительства, например, при диагностике технического состояния ограждающих конструкций новыми подходами [19], при моделировании динамических и сейсмических воздействий [20] и др.

Выводы

1. В статье представлен новый подход к оценке индекса надежности стержней стальных ферм с использованием при неопределенности случайных величин, выраженной в наличии информации лишь о границах изменчивости.

2. Данные статистического моделирования методом Монте-Карло отражают аналогию индекса надежности в рассматриваемом графическом подходе с вероятностью безотказной работы элемента фермы.

3. Индекс надежности η , определяемый графическим способом, занижает уровень вероятности безотказной работы, что вызвано отсутствием более точной информации о виде распределения вероятностей. Индекс надежности, определяемый аналитически по формуле (10), может быть использован для сравнительной оценки надежности элементов, но не для интерпретации вероятности безотказной работы элемента фермы.

Список литературы

1. Мкртычев О.В., Щедрин О.С., Лохова Е.М. Определение коэффициентов надежности по ответственности для отдельных несущих элементов на основе вероятностного анализа // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1331–1346. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346
2. Адищев В.В., Шмаков Д.С. Метод построения функции принадлежности с «прямой» обработкой исходных данных // *Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин)*. 2013. Т. 16. № 2 (56). С. 45–66.
3. Jiang C., Zheng J., Han X. Probability-interval hybrid uncertainty analysis for structures with both aleatory and epistemic uncertainties: a review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018, vol. 57, no. 6, pp. 2485–2502. DOI: 10.1007/s00158-017-1864-4
4. Ben-Haim Y., Elishakoff I. Convex models of uncertainty in applied mechanics. – Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier, 1990. 240 p.
5. Elishakoff I., Daphnis A. Simple application of interval analyses to structural safety: standard versus parameterised versions. *International Journal of Sustainable Materials and Structural Systems*. 2018, vol. 3, no. 3–4, pp. 203–217.
6. Wang R., Wang X., Wang L., Chen X. Efficient computational method for the non-probabilistic reliability of linear structural systems. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2016, vol. 29, no. 3, pp. 284–299.
7. Tao J., Jian-Jun C., Ya-Lan X. A semi-analytic method for calculating non-probabilistic reliability index based on interval models. *Applied Mathematical Modelling*. 2007, vol. 31, no. 7, pp. 1362–1370.
8. Guo S.X., Lu Z.Z. A non-probabilistic robust reliability method for analysis and design optimization of structures with uncertain-but-bounded parameters. *Applied Mathematical Modelling*. 2015, vol. 39, no. 7, pp. 1985–2002.
9. Kang Z., Luo Y. Non-probabilistic reliability-based topology optimization of geometrically nonlinear structures using convex models. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2009, vol. 198, no. 41–44, pp. 3228–3238.
10. Duncan J.M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical Engineering*. 2000, vol. 126, no. 4, pp. 307–316.
11. Уткин В.С., Уткин Л.В. Расчет надежности строительных конструкций при различных способах описания неполноты информации. Вологда: ВоГТУ. 2009. 126 с.
12. Dvoretzky A., Kiefer J., Wolfowitz J. Asymptotic minimax character of the sample distribution function and of the classical multinomial estimator. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1956, no. 27(3), pp. 642–669. DOI:10.1214/aoms/1177728174
13. Pradlwarter H.J., Schuëller G.I. The use of kernel densities and confidence intervals to cope with insufficient data in validation experiments. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2008, vol. 197, no. 29–32, pp. 2550–2560.

14. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: Издательство «XYZ». 2022. 654 с.
15. Elishakoff I. Safety Factors and Reliability: Friends or Foes? Berlin: Springer Netherlands, 2004. 296 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-2131-2
16. Guo S.X. A non-probabilistic model of structural reliability based on interval analysis. *Chinese Journal of Computational Mechanics*. 2001, vol. 18, no. 1, pp. 56–60.
17. Wang X.J., Qiu Z.P., Elishakoff I. Non-probabilistic set-theoretic model for structural safety measure. *Acta Mechanica*. 2008, vol. 198, no. 1, pp. 51–64.
18. Соловьева А.А., Соловьев С.А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 153–167.
19. Карпов Д.Ф. Алгоритм комплексной диагностики технического состояния строительных конструкций по анализу термограмм // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т. 2. № 2. С. 23–28.
20. Jiang C., Ni B.Y., Han X., Tao Y.R. Non-probabilistic convex model process: a new method of time-variant uncertainty analysis and its application to structural dynamic reliability problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2014, vol. 268, pp. 656–676.

References

1. Mkrtychev O.V., Shchedrin O.S., Lokhova E.M. Determination of individual coefficients on the basis of probabilistic analysis. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022, vol. 17, no. 10, pp. 1331–1346. DOI:10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346 [In Russian].
2. Adishchev V.V., Shmakov D.S. Method of constructing the membership function with "direct" processing of initial data. *Proceedings of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)*. 2013, vol. 16, no. 2, pp. 45–66. [In Russian].
3. Jiang C., Zheng J., Han X. Probability-interval hybrid uncertainty analysis for structures with both aleatory and epistemic uncertainties: a review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018, vol. 57, no. 6, pp. 2485–2502.
4. Ben-Haim Y., Elishakoff I. Convex models of uncertainty in applied mechanics. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier, 1990. 240 p.
5. Elishakoff I., Daphnis A. Simple application of interval analyses to structural safety: standard versus parameterised versions. *International Journal of Sustainable Materials and Structural Systems*. 2018, vol. 3, no. 3–4, pp. 203–217.
6. Wang R., Wang X., Wang L., Chen X. Efficient computational method for the non-probabilistic reliability of linear structural systems. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2016, vol. 29, no. 3, pp. 284–299.
7. Tao J., Jian-Jun C., Ya-Lan X. A semi-analytic method for calculating non-probabilistic reliability index based on interval models. *Applied Mathematical Modelling*. 2007, vol. 31, no. 7, pp. 1362–1370.
8. Guo S.X., Lu Z.Z. A non-probabilistic robust reliability method for analysis and design optimization of structures with uncertain-but-bounded parameters. *Applied Mathematical Modelling*. 2015, vol. 39, no. 7, pp. 1985–2002.
9. Kang Z., Luo Y. Non-probabilistic reliability-based topology optimization of geometrically nonlinear structures using convex models. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2009, vol. 198, no. 41–44, pp. 3228–3238.
10. Duncan J.M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical Engineering*. 2000, vol. 126, no. 4, pp. 307–316.
11. Utkin V.S., Utkin L.V. Raschet nadezhnosti stroitel'nykh konstrukcij pri razlichnykh sposobah opisaniya nepolnoty informacii [Structural reliability analysis with different approaches to describing the incompleteness of data]. Vologda: VoGTU, 2009. 126 p. (In Russian)

12. Dvoretzky A., Kiefer J., Wolfowitz J. Asymptotic minimax character of the sample distribution function and of the classical multinomial estimator. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1956, no. 27(3), pp. 642–669. DOI:10.1214/aoms/1177728174
13. Pradlwarter H.J., Schuëller G.I. The use of kernel densities and confidence intervals to cope with insufficient data in validation experiments. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2008, vol. 197, no. 29–32, pp. 2550–2560.
14. Sharyj S.P. Konechnomernyj interval'nyj analiz [Finite-dimensional interval analysis]. Novosibirsk: Izdatel'stvo XYZ, 2022. 654 p. [In Russian]
15. Elishakoff I. Safety Factors and Reliability: Friends or Foes? Berlin: Springer Netherlands, 2004. 296 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-2131-2
16. Guo S.X. A non-probabilistic model of structural reliability based on interval analysis. *Chinese Journal of Computational Mechanics*. 2001, vol. 18, no. 1, pp. 56–60.
17. Wang X.J., Qiu Z.P., Elishakoff I. Non-probabilistic set-theoretic model for structural safety measure. *Acta Mechanica*. 2008, vol. 198, no. 1, pp. 51–64.
18. Soloveva A.A., Solovev S.A. Reliability analysis of planar steel trusses based on p-box models. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021, vol. 16, no. 2, pp. 153–167. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.153-167 [In Russian].
19. Karpov D.F. The algorithm of complex diagnostics of technical condition of building structures on thermograms analysis. *Stroitel'nye materialy i izdeliya [Construction Materials and Products]*. 2019, vol. 2, no. 2, pp. 23–28. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-2-23-28 [In Russian]
20. Jiang C., Ni B.Y., Han X., Tao Y.R. Non-probabilistic convex model process: a new method of time-variant uncertainty analysis and its application to structural dynamic reliability problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2014, vol. 268, pp. 656–676.

Данные об авторах / Information about authors

Соловьев Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Вологодский государственный университет (ВоГУ), Вологда, Россия
solovevsa@vogu35.ru

Solovev Sergey A., Cand. Sci. (Engineering), associate professor of industrial and civil engineering department, Vologda State University, Russia
solovevsa@vogu35.ru

Иньков Александр Эдуардович, аспирант, преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Вологодский государственный университет (ВоГУ), Вологда, Россия
inkovaie@vogu35.ru

Inkov Alexander E., post-graduate student, lecturer of industrial and civil engineering department, Vologda State University, Russia
inkovaie@vogu35.ru

Соловьева Анастасия Андреевна, аспирант, преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Вологодский государственный университет (ВоГУ), Вологда, Россия
solovevaaa@vogu35.ru

Soloveva Anastasia A., post-graduate student, lecturer of industrial and civil engineering department, Vologda State University, Russia
solovevaaa@vogu35.ru

УДК 69.07

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-45-58](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-45-58)

Теоретические и экспериментальные исследования

Разработка датчика для определения напряжений внутри железобетонных конструкций. Часть 1

**Трекин Николай Николаевич¹, Авдеев Кирилл Владимирович²,
Кодыш Вадим Эмильевич³, Шмаков Сергей Дмитриевич^{2,4},
Черепанов Андрей Викторович^{2,5}, Тучин Михаил Александрович²,
Чаганов Алексей Борисович⁵**

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (МГСУ). Москва, Российская Федерация

² АО «ЦНИИПромзданий». Москва, Российская Федерация

³ АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

⁴ ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)). Москва, Российская Федерация

⁵ ФГБОУ ВО «Вятский Государственный Университет» (ВятГУ). Киров, Российская Федерация

Аннотация: В статье представлены результаты первого этапа разработки оптимальной конструкции датчика напряжения, позволяющего оценивать напряженно-деформированное состояние сечения внутри экспериментальной железобетонной конструкции. Задачей являлась разработка датчика напряжения, обладающего высокой конструктивной прочностью (способностью сохранять работоспособность при давлении более 350 кгс/см²), стабильностью результатов измерения, а также простотой изготовления. Рассмотрен опыт применения датчиков напряжения, основанных на различных физических принципах, а также представлена краткая историческая справка развития методов определения напряжений строительных конструкций зданий и сооружений.

Ключевые слова: датчик напряжения, тензорезистор, результаты экспериментальной работы, особое предельное состояние, железобетонные конструкции

Для цитирования: Трекин Н.Н., Авдеев К.В., Кодыш В.Э., Шмаков С.Д., Черепанов А.В., Тучин М.А., Чаганов А.Б. Разработка датчика для определения напряжений внутри железобетонных конструкций. Часть 1 // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 4. С. 45–58.

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-45-58](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-45-58)

Theoretical and experimental studies

Development of a sensor for determining stresses inside reinforced concrete structures. Part 1

**Trekin Nikolai N.¹, Avdeev Kirill V.², Kodysh Vadim E.³,
Shmakov Sergey D.^{2,4}, Cherepanov Andrey V.^{2,5},
Tuchin Mikhail A.², Chaganov Aleksey B.⁵**

@ N.N. Trekin, K.V. Avdeev, V.E. Kodysh, S.D. Shmakov, A.V. Cherepanov, M.A. Tuchin, A.B. Chaganov, 2023

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU). Moscow, Russian Federation

² Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions. Moscow, Russian Federation

³ Scientific Research Center «Construction». Moscow. Russian Federation

⁴ Russian university of transport (МИИТ). Moscow, Russian Federation

⁵ Vyatka State University. Kirov, Russian Federation

Abstract: The article presents the results of the first stage of the development of the optimal design of the stress sensor, which allows to evaluate the stress-strain state of the section inside the experimental reinforced concrete structure. The task was to develop a voltage sensor with high structural strength (the ability to maintain operability at a pressure of more than 350 kg / cm²), stability of measurement results, as well as ease of manufacture. The experience of using voltage sensors based on various physical principles is considered, as well as a brief historical background of the development of methods for determining the stresses of building structures of buildings and structures is presented.

Keywords: voltage sensor, strain gauge, experimental results, special limit state, reinforced concrete structures

For citation: Trekin N.N., Avdeev K.V., Kodysh V.E., Shmakov S.D., Cherepanov A.V., Tuchin M.A., Chaganov A.B. Development of a sensor for determining stresses inside reinforced concrete structures. Part 1. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 4, pp. 45–58. [In Russian]

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-45-58](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-45-58)

Введение

Большие человеческие жертвы и огромный материальный ущерб, возникающие при землетрясении, вынуждают инженерное сообщество искать решения, позволяющие воспринимать особые воздействия. Одни из первых попыток учета и систематизации сейсмических воздействий в строительных нормах отмечаются в начале 20-го века [1]. Постоянное совершенствование нормативных документов в части учета особых нагрузок и воздействий, включая сейсмические (в РФ – СП 14.13330 «Строительство в сейсмических районах» [2]), позволяет обеспечивать необходимую надежность и безопасность объектов строительства. Однако, применение специализированных конструктивных решений, а также учет дополнительных воздействий при проектировании защиты таких объектов повышают стоимость строительства. Уточнение сейсмичности районов в сторону повышения, а также изменение норм расчета защиты зданий и сооружений от сейсмических воздействий приводит к тому, что построенные ранее объекты строительства не соответствуют действующим нормам, что особенно актуально при реконструкции зданий и сооружений. Снижение стоимости защиты зданий и сооружений в этих районах при сейсмических воздействиях, особенно в условиях проведения реконструкции, может быть достигнуто двумя путями: 1 – обязательной реконструкцией путей эвакуации, в т.ч. на этапе проведения капитального ремонта, что гораздо экономичнее, чем усиление всех несущих конструкций объекта строительства (зачастую, сплошное усиление бывает либо невозможно, либо экономически нецелесообразно в сравнении со сносом объекта и последующим новым его строительством на данном месте); 2 – поиск внутренних резервов, за счет учета работы конструктивных элементов в особом предельном состоянии, учет которого допускается,

например, при взрывных воздействиях.

В действующих нормативных документах, регламентирующих особые воздействия, например, таких, как СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения» [3] предложены некоторые критерии особого предельного состояния для железобетонных конструкций, которые назначены исходя из имеющейся практики проектирования, эксплуатации, опыта обследования технического состояния конструкций, а также экспериментальных исследований. Для уточнения критериев особого предельного состояния железобетонных конструкций необходимо проведение экспериментальных исследований, позволяющих изучить изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) плоского сечения изгибаемого железобетонного элемента на стадии близкой к максимальной несущей способности и за ее пределами (стадии разупрочнения). Особенности определения НДС сечения на стадии разупрочнения будут рассмотрены ниже.

Практический метод экспериментального определения механических напряжений открыт Робертом Гуком в 1678 году. Он обнаружил связь между механическим напряжением и возникающей деформацией. Эта деформация также возникает на поверхности объектов и поэтому доступна для измерения.

В дальнейшем, совокупность экспериментальных методов определения механического напряжения детали или конструкции, основанных на измерении деформаций или других параметров материала, вызванных механическим напряжением, стали называть тензометрией, а приборы, предназначенные для измерения деформаций – тензомерами. Тензомеры по принципам действия подразделяются на механические, электрические, оптические, пневматические и акустические.

В начале 20-го века при оценке напряженно-деформированного состояния строительных конструкций применялись громоздкие механические устройства (тензомеры), которые отображали напряжение, используя отношение рычага один к тысяче или более. К недостаткам применения данного технического решения можно отнести возможность наблюдения только статических процессов, необходимость применения сложных приспособлений для фиксации тензомеров, предотвращающих скольжение устройств в условиях вибрации, необходимость размещения испытуемого образца в прямой видимости наблюдателя для считывания показателей и т.п.

Начиная со второй половины 30-х годов 20-го века [4], развитие техники позволило массово применить электрические тензорезисторы, практически лишенные вышеперечисленных недостатков механических тензомеров.

Рассматривая работу изгибаемого элемента на стадии, близкой к его максимальной несущей способности, стоит отметить ряд особенностей проведения экспериментальной работы: нормально армированное сечение железобетонного изгибаемого элемента имеет напряжения бетона и арматуры, близкие к разрушающим, что приводит к образованию трещин, лещадок и выколу сжатых слоев бетона, расположенных в сечениях с наибольшими напряжениями. Изгибаемый элемент на стадии, близкой к максимальной несущей способности, из-за раскрытия трещин в растянутой его части может рассматриваться как элемент, разделенный на «упругие блоки», в результате чего возникает ситуация, когда каждое конкретное сечение имеет свое специфическое напряженно-деформированное состояние [5]. Оценку НДС сечения целесообразно производить в «блоке», имеющем наибольшие напряжения. Применение механических тензомеров для оценки НДС сечения крайне осложнено, т.к. поверхность изгибаемого элемента разрушается, а применение электрических тензорезисторов, расположенных на боковой поверхности изгибаемого элемента нецелесообразно после образования в рассматриваемом сечении выколов бетона. Решить проблему оценки напряженно-

деформированного состояния изгибаемого элемента позволяет применение датчиков напряжения, размещенных внутри сечения железобетонного элемента.

Для фиксации напряжений внутри сечения железобетонного элемента, а соответственно и определения изменения высоты сжатой зоны плоского сечения изгибаемого элемента целесообразна разработка датчиков напряжения малого размера, конструкция которых позволяет осуществить их размещение внутри сечения масштабных моделей опытных конструкций.

При выборе оптимальной конструкции датчиков напряжения были рассмотрены датчики, работающие на различных физических принципах. Пьезокерамические датчики, датчики, основанные на эффекте магнитоупругости, струнные (частотные), а также датчики с применением тензорезисторов. При выборе конструкции датчика напряжения был изучен опыт реализации аналогичного технического решения, применяемого в экспериментальных работах ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко [6], где в массивное сечение железобетонного элемента устанавливались магнитоупругие датчики (рис. 1).

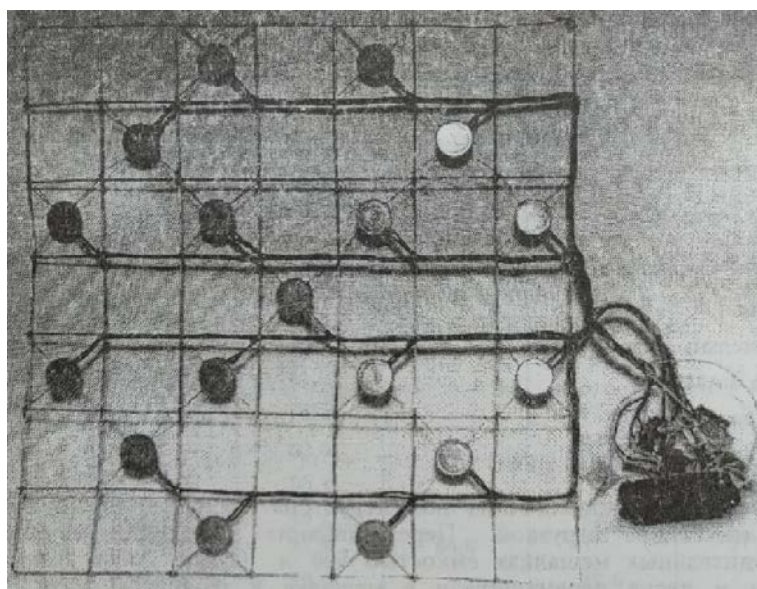


Рисунок 1 – Датчики напряжения типа ДК, разработанные НИИ строительства СССР [6]

Figure 1 – DC type voltage sensors developed by the Research Institute of Construction of the USSR [6]

В работе не описана номенклатура датчиков и их устройство. Поиск аналогов среди существующих образцов результатов не дал.

Была предпринята попытка найти среди современных решений устройство, позволяющее определять напряжения в сечении лабораторного образца (масштабной модели строительной конструкции). Особенности экспериментального исследования на основе масштабных (уменьшенных) моделей является необходимость учета влияния размеров и формы закладных датчиков на напряженно-деформированное состояние конструкции.

Результаты анализа представлены в таблице 1. В таблицу не вошли различные варианты датчиков для поверхностного измерения напряжений (тензорезисторные, индукционные и кварцевые) по описанным выше причинам. Также в таблицу не вошли устройства, не имеющие применения и не производящиеся в настоящее время. (пьезокерамические датчики, датчики на основе магнитоупругости).

В ходе анализа было выявлено, что несмотря на имеющиеся отработанные решения, все они разрабатывались в первую очередь для мониторинга работы полноразмерных конструкций, и не имеют нужной разрешающей способности ввиду своих габаритов. Необходимо отметить высокую стоимость данных датчиков и отсутствие возможности повторного применения, что не является значимым фактором при осуществлении мониторинга строительных конструкций (приборы, применяемые при дистанционном мониторинге эксплуатационной надежности зданий представлены в [7–8]). В случае проведения серии лабораторных испытаний по разрушению конструктивных элементов, стоимость датчика играет значимую роль, ввиду необходимости применения большого их количества на каждой исследуемой конструкции.

Таблица 1. Современные типы датчиков, используемые для измерения напряжений в бетоне

Table 1. Modern types of sensors used to measure stresses in concrete

Тип (описание)	Габариты*, мм	Изображение
Струнные закладные датчики. (Конструктивно выполнены из двух концевых частей, соединенных трубкой, которая защищает кусок стальной проволоки. Оба конца имеют плоский круглый фланец, позволяющий передавать деформацию бетона на проволоку. В центре тензометра установлен электромагнитный датчик. Возникающая в бетоне деформация изменяет его резонансную частоту, которую считывает электромагнитный датчик) [9]	d15,9 x 50 мм	
Закладной датчик, на основе тензорезисторов. (Датчик представляет собой металлический вал с фланцем. На валу размещены тензорезисторы, подключенные по мостовой схеме, герметично защищенные пластиковым корпусом) [10]	d25 x 100 мм	

*Указаны минимальные габариты датчиков среди известных решений

Выбор конструктивного решения датчика напряжения на основе тензорезисторов

В связи с отсутствием датчиков, пригодных для определения напряжений в сечении масштабных конструктивных элементов, была предпринята попытка разработки корпуса датчика собственной конструкции на основе тензорезисторов. В ходе первоначального конструирования рассматривалась гипотеза, что оптимальной с точки

зрения простоты, технологичности и надежности, будет конструкция датчика в виде тензорезистора, расположенного внутри упругого корпуса из однородного компаунда, равномерно сопряженного с тензорезистором, имеющим минимальные размеры, позволяющие объективно оценить деформации (напряжения) в сечении. В этом случае деформации корпуса датчика, расположенного внутри сечения монолитной конструкции (например, бетонной), должны вызывать равномерные деформации тензорезистора. Также, с точки зрения снижения погрешностей измерения, было необходимо исключить изгибную деформацию датчика, поскольку в этом случае интерпретация изменения сопротивления тензорезистора осложняется.

Принимая во внимание изложенные соображения, первоначальная конструкция датчика представляла собой цилиндр диаметром 10 мм и высотой 8 мм из эпоксидной смолы с расположенным внутри него в горизонтальной плоскости тензорезистором с базой 3 x 1,5 мм. Круглая форма датчика была принята с целью обеспечения равномерности деформаций корпуса. Диаметр корпуса обусловлен минимально возможной величиной для технологичного расположения тензорезистора (подложка тензорезистора имеет размер 6 x 4 мм). Поперечное расположение тензорезистора (перпендикулярное для продольной оси железобетонной конструкции), было выбрано исходя из того, что при деформации датчика вдоль продольной оси обеспечиваются деформации тензорезистора исключительно на растяжение и сжатие, что было бы сложно обеспечить при его вертикальном расположении. Высота, приближенная по значению к диаметру, обеспечивает снижение изгибных деформаций.

В качестве материала изготовления была выбрана эпоксидная смола ЭД-20 с отвердителем ПЭПА. Выбор данных материалов был обусловлен:

- 1) легкодоступностью данных материалов и их низкой стоимостью;
- 2) технологичностью (отсутствие необходимости термической обработки при отверждении) [11];
- 3) диэлектрическими свойствами, благодаря которым отпадала необходимость в дополнительной изоляции тензорезистора [11];
- 4) химической устойчивостью к компонентам бетона [11];
- 5) механическими свойствами – разрушающее напряжение при сжатии – до 113 МПа, модуль упругости 2500 – 3500 МПа [12].

В качестве пробной партии было изготовлено 15 датчиков.

При изготовлении первой партии был выявлен ряд дефектов:

- 1) Систематическое смещение тензорезисторов внутри корпуса датчика хаотичным образом, возникающее в период полимеризации эпоксидной смолы как правило сразу по нескольким осям и углам поворота (рис. 2);
- 2) Одна из поверхностей датчиков (примерно в 40% случаев) оказывалась отличной от плоскости (рис. 3 – 4);
- 3) Неравномерность структуры полимеризованной смолы была выявлена при подсвечивании корпуса датчика лазером (532 нм) (рис. 5);
- 4) Пузырьки вовлеченного воздуха (рис. 6 – 7);
- 5) Инородные включения (пыль) (рис. 7).

Смещение датчиков объясняется тем, что будучи изначально выставленным в нужную позицию, тензорезистор смещался в ходе отверждения смоляной массы при её перераспределении внутри формы и выхода вовлеченного в ходе перемешивания воздуха.

Искажение плоской формы (рис. 3 – 4) поверхности было связано с тем, что заливочная форма не имела крышки, а текучесть смолы оказалась недостаточной для стабильного самовыравнивания.

Неравномерность структуры (рис. 5), вероятно, объясняется особенностями отверждения смолы.

Наличие пузырьков воздуха и пыли в смоле объясняется условиями производства датчиков.

Для проверки работоспособности изделия и выявления наиболее существенных дефектов, была проведена тарировка датчиков. Тарировка проводилась ступенчатым нагружением датчиков известным весом. Результаты представлены на рис. 8 – 9.

В ходе анализа результатов тарировки было выявлено, что смещение тензорезистора внутри корпуса датчика оказывает наибольшее негативное влияние на стабильность показаний тензорезисторов. В случаях, когда при тарировании выявлялось резкое изменение показателей датчика, были выявлены трещины корпуса, выполненного из смолы, что свидетельствует о низкой механической прочности и склонности к хрупкому разрушения данного материала.

Т.к. из всех выявленных дефектов только смещение тензорезистора внутри корпуса датчика отразилось на показаниях датчиков, был разработан кондуктор для его фиксации внутри корпуса (рис. 10 – 11). Кондуктор изготавливался с помощью FDM технологии.

Были рассмотрены различные способы совершенствования конструкции датчиков:

1. Размещение на торцах датчиков тонких стальных пластин (рисунок 12). Предполагались следующие положительные эффекты: усреднение значений давления по площади датчика, снижение влияния заполнителя бетона, увеличение надежности.

2. Размещение на боковой поверхности датчика демпфера из мягкого материала (рис. 13), влияние которого по замыслу должно было исключать обжатие боковой поверхности датчика, позволяющее ему деформироваться более свободно, а также исключаящее влияние касательных напряжений, возникающих в бетонном сечении.

3. Исполнение корпуса датчика с применением кондуктора (рис. 10 – 11).

Для проверки данных конструктивных решений были изготовлены испытательные образцы в виде бетонных призм 100 x 100 x 300 мм, в срединном сечении которых располагалось по 6 датчиков, закрепленных на проволочных рамках (рис. 14 – 15). По одной призме с каждым типом датчиков. Нагружение производилось на прессе П-50. Предварительно с помощью разрушения кубов, выполненных из того же материала, был определен класс бетона по прочности, равный В22,5. Величина нагружений призм была рассчитана исходя из условия их работы в упругой зоне.



Рисунок 2 – Смещение тензорезистора в корпусе

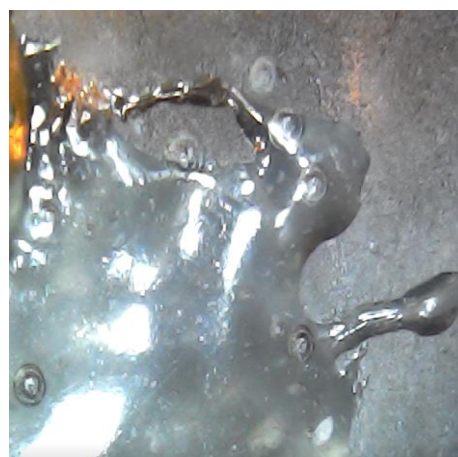


Рисунок 3 – Наплыв смолы на поверхности датчика

Figure 2 – Displacement of the strain gauge in the housing

Figure 3 – Resin influx on the sensor surface

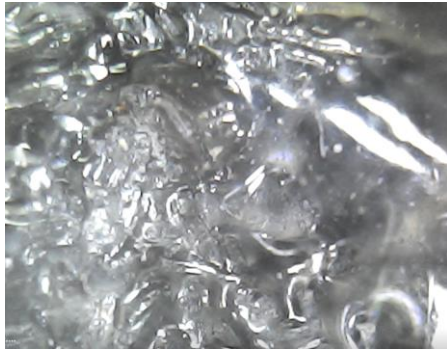


Рисунок 4 – Неровная поверхность датчика

Figure 4 – Uneven sensor surface

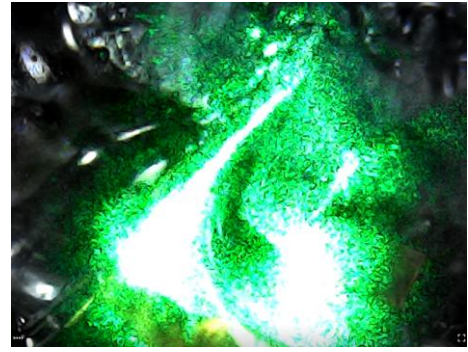


Рисунок 5 – Искажение пятна засветки лазерного луча при прохождении сквозь корпус показывает неоднородность структуры

Figure 5 – Distortion of the spot of illumination of the laser beam when passing through the housing shows the heterogeneity of the structure



Рисунок 6 – Пузырьки воздуха на фоне решетки тензорезистора

Figure 6 – Air bubbles on the background of a strain gauge grating

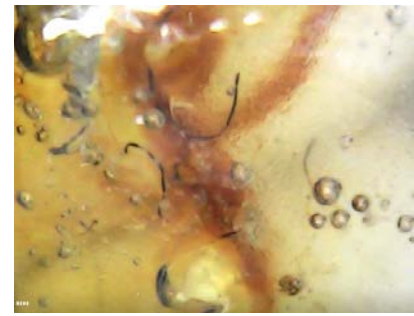


Рисунок 7 – Пузырьки воздуха и инородные включения (мусор)

Figure 7 – Air bubbles and foreign inclusions (debris)

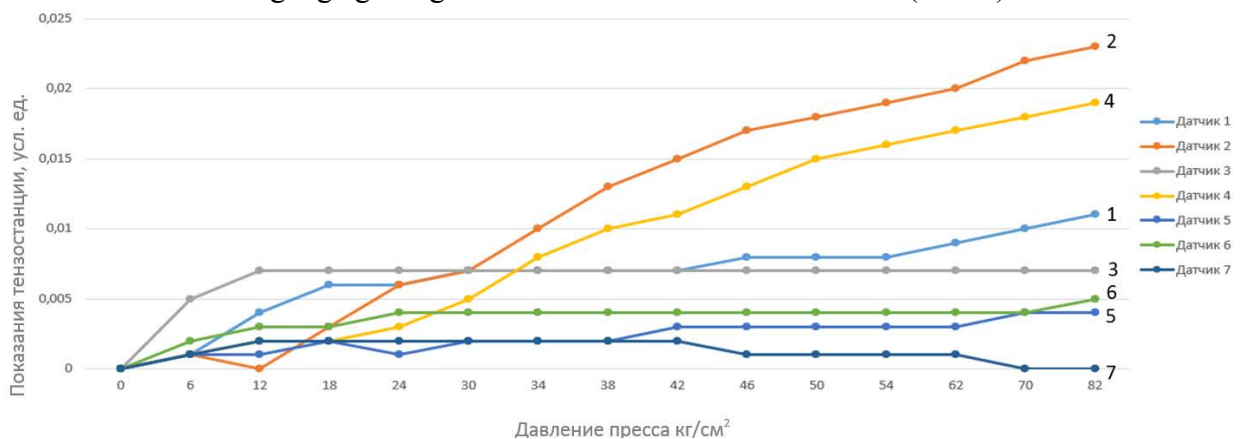


Рисунок 8 – График тарировки датчиков 1–7

Figure 8 – Calibration graph of sensors 1–7

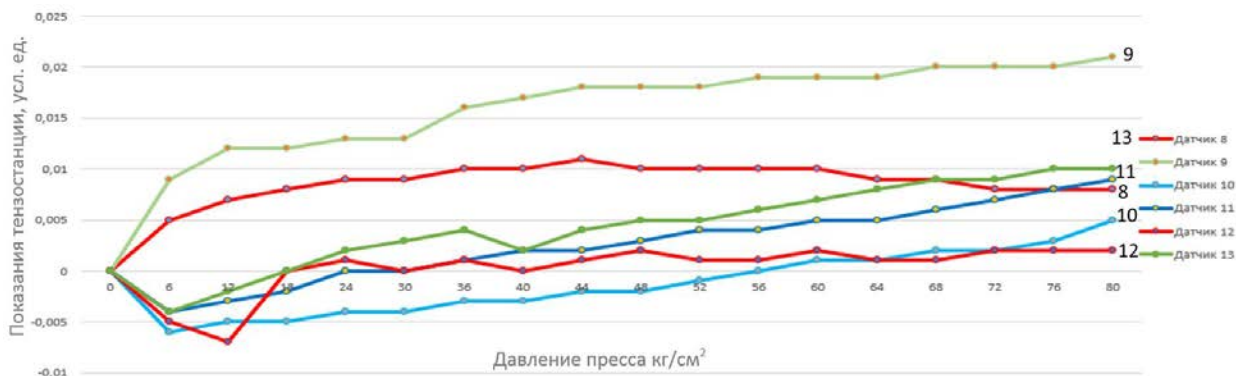


Рисунок 9 – График тарировки датчиков 8–13

Figure 9 – Calibration graph of sensors 8–13

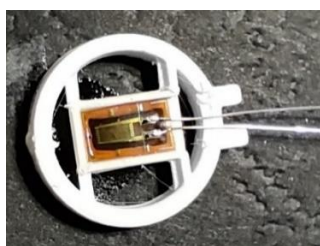


Рисунок 10 – Тензорезистор внутри кондуктора

Figure 10 – Strain gauge inside the conductor



Рисунок 11 – Готовые датчики с кондуктором

Figure 11 – Ready-made sensors with a conductor



Рисунок 12 – Датчик с пластинами

Figure 12 – Sensor with plates



Рисунок 13 – Датчик с демпфером

Figure 13 – Sensor with damper



Рисунок 14 – Рамка с датчиками

Figure 14 – Frame with sensors



Рисунок 15 – Призма, подготовленная к испытаниям

Figure 15 – A prism prepared for testing

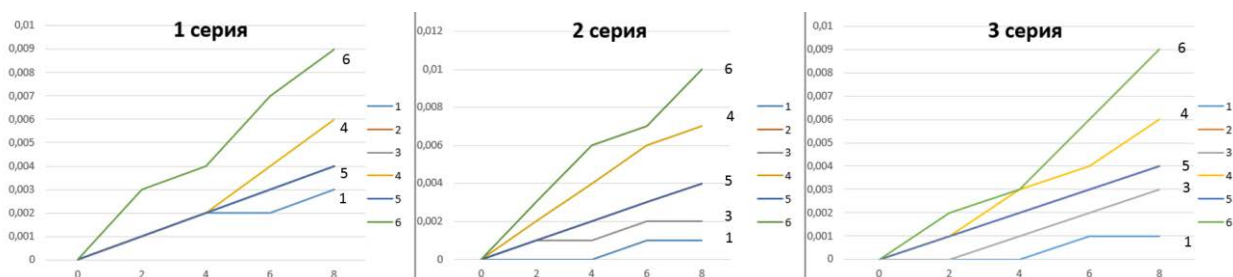


Рисунок 16 – Показания датчиков без доработок (с кондуктором)

Figure 16 – Sensor readings without modifications (with conductor)



Рисунок 17 – Показания датчиков с демпферами

Figure 17 – Sensor readings with dampers

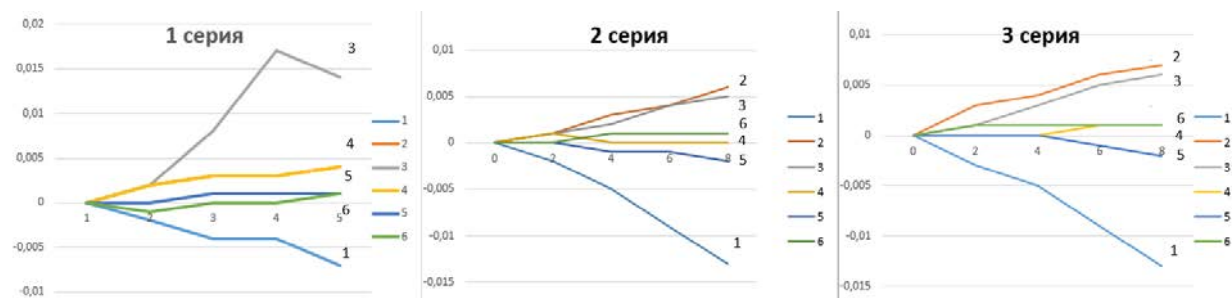


Рисунок 18 – Показания датчиков с пластинами

Figure 18 – Sensor readings with plates

Производилось по 3 нагружения каждой призмы до значения нагрузки 8 тонн. Показания тензорезисторов при испытаниях фиксировались прибором Терем–4.0. Результаты представлены на рис. 16–18.

Анализ полученных данных привел к следующим выводам:

1) Большинство датчиков без пластин и демпферов показывают нелинейные приращения при линейном нагружении.

2) Датчики с демпферами выдают не интерпретируемые данные, что опровергает гипотезу об исключении влияния касательных напряжений, возникающих в бетонном сечении с помощью демпфера выбранной конструкции.

3) Сходимость показаний датчиков с пластинами ниже, чем датчиков без пластин и демпферов.

4) Все типы датчиков демонстрируют нерегулярность показаний. Одни и те же датчики показывают разные значения при одинаковых нагрузках в последовательных испытаниях.

Выводы

1. Предпринятые усилия по усовершенствованию датчиков и улучшению их характеристик не привели к заметным положительным результатам.

2. Дальнейшие усовершенствования датчиков и избавление их от таких дефектов, как вовлеченный в структуру смолы воздух и обеспечение защиты от попадания в смолу пыли, представляются нерациональными в виду их большой технической и технологической сложности и стоимости.

3. Выявлена ненадежность данного типа корпуса датчика по причине склонности к хрупкому разрушению.

4. Выявлено изменение показаний датчиков для одной и той же нагрузки в ходе их последовательных нагружений, что мешает проведению тарировки и затрудняет их применение. Причина данного явления не раскрыта, но имеются предположения, что она кроется в неоднородности структуры отвержденной смолы.

Проанализировав выявленные проблемы в производстве датчиков из эпоксидной смолы, было принято решение отказаться от применения данного материала по причинам сложно устранимых дефектов производства в условиях лаборатории, а также выявленных проблем с однородностью корпуса датчика.

Учитывая вышеизложенные недостатки датчиков напряжения, выполненных на основе корпуса из эпоксидной смолы, были представлены следующие требования к материалу и конструкции датчика напряжения:

– высокая стабильность физических свойств и состава материала, которая должна быть обеспечена от образца к образцу;

- высокая конструктивная прочность материала (нормальная работа при напряжениях до 400 кгс/см²);
- низкая стоимость изготовления датчика;
- возможность легкой механической обработки материала;
- относительные деформации образца должны быть максимально схожи с относительными деформациями бетона.

Продланное экспериментальное исследование (более 50 изготовленных датчиков, 10 кубов и 6 призм) показали, что изготовленные в имеющихся условиях датчики с корпусом из эпоксидной смолы не могут обеспечить стабильную работу для измерения напряжений внутри сечения. Оценка факторов влияния показала перспективным использование в качестве корпуса датчика напряжения металлических сплавов. Отчет о разработке датчика напряжения, выполненный в корпусе из металлического сплава будет представлен в следующей статье.

Список литературы

1. Holmes W.T. et al. Seismic Performance Objectives for Tall Buildings. 2008. 114 p.
2. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Росстандарт; 2018.
3. СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. Росстандарт; 2019.
4. Клокова Н.П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки. Москва: Машиностроение. 1990. 224 с.
5. Гуца Ю.П. Статическая прочность железобетонных конструкций и их деформаций в стадии, близкой к разрушению. дисс. докт. техн. наук 05.23.01. Москва: 1980. 401 с.
6. Матков Н.Г. Сопротивление сталеполимербетонных конструкций и их стыков. Москва: Воентехлит. 1999. 164 с.
7. Бубис А.А., Абреков З.М., Закраилов З.З., Кахновский А.М., Кодыш В.Э., Поляков В.С. Дистанционный мониторинг эксплуатационной надежности зданий // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 1. С. 64–81.
8. Оганесян С.М., Карапетян С.С., Геодакян Э.Г., Карапетян Д.К. Опыт и результаты инженерно-сейсмометрического мониторинга объектов гидротехнических сооружений республики Армении // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2014. № 1. С. 55–59.
9. Накладной струнный тензометр EWV SCIBIM [Электронный ресурс]. URL: <https://zetlab.com/shop/datchiki/tensodatchiki/strunnyie-tenzometry-i-datchiki-deformatsii/ewv-scigauge/> (дата обращения: 15.08.2023).
10. Датчик механической деформации ZET 901 [Электронный ресурс]. URL: <https://zetlab.com/shop/datchiki/tensodatchiki/strunnyie-tenzometry-i-datchiki-deformatsii/zet-901/> (дата обращения: 15.08.2023).
11. Научно-производственное предприятие Химэкс [Электронный ресурс] URL: <https://www.chimexltd.com/catalog/epoksidnye-smolye-aktivnye-razbaviteli/> (дата обращения: 15.08.2023).
12. Воронков А.Г., Ярцев В.П. Эпоксидные полимеррастворы для ремонта и защиты строительных изделий и конструкций. Тамбов: Изд-во ТГТУ. 2006. 92 с.

References

1. Holmes W.T. et al. Seismic Performance Objectives for Tall Buildings. 2008. 114 p.
2. СП 14.13330.2018 Seismic building design code. Rosstandart; 2018.

3. СП 385.1325800.2018 Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic statements. Rosstandart; 2019.
4. Klokova N.P. Tensoresistors: Theory, calculation methods, developments. Moscow: Mechanical Engineering. 1990, 224 p. [In Russian]
5. Gushcha Yu. P. Static strength of reinforced concrete structures and their deformations at a stage close to destruction. diss. doct. technical sciences 05.23.01. *Staticheskaya prochnost' zhelezobetonnykh konstruksiy i ikh deformatsiy v stadii, blizkoy k razrusheniyu. diss. dokt. tekhn. nauk 05.23.01*. Moscow: 1980, 401 p. [In Russian]
6. Matkov N.G. Resistance of steel-polymer concrete structures and their joints. Moscow: Voentehlit. 1999, 164 p. ([n Russian])
7. Bubis A.A., Abrekov Z.M., Zakrailov Z.Z., Kakhnovsky A.M., Kodysh V.E., Polyakov V.S. Remote monitoring of operational reliability of buildings. Distantionnyy monitoring ekspluatatsionnoy nadezhnosti zdaniy. *Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 1. pp. 64–81. ([n Russian])
8. Hovhannesyanyan S.M., Karapetyan S.S., Geodakyan E.G., Karapetyan J.K. The tests and results of engineering and seismic monitoring of objects of hydraulic structures of Armenia. Opyt i rezul'taty inzhenerno-seysmometricheskogo monitoringa ob'yektov gidrotekhnicheskikh sooruzheniy respubliky Armenii. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2014, no. 1, pp. 55–59. [In Russian]
9. Attached string strain gauge EWV SCIBIM URL: <https://zetlab.com/shop/datchiki/tensodatchiki/strunnyie-tenzometryi-i-datchiki-deformatsii/ewv-scigauge/> (date of the application: 15.08.2023).
10. Sensor of mechanical deformation ZET 901 URL: <https://zetlab.com/shop/datchiki/tensodatchiki/strunnyie-tenzometryi-i-datchiki-deformatsii/zet-901/> (date of the application: 15.08.2023).
11. Himex scientific and production enterprise URL: <https://www.chimexltd.com/catalog/epoksidnye-smoly-aktivnye-razbaviteli/> (date of the application: 15.08.2023).
12. Voronkov A.G., Yartsev V.P. Epoxy polymer solutions for repair and protection of building products and structures. Tambov: Publishing House of TSTU. 2006, 92 p. [In Russian]

Данные об авторах / Information about authors

Трекин Николай Николаевич, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (МГСУ). Доктор технических наук, профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции». Москва, Российская Федерация
e-mail: otks@yandex.ru

Nikolai N. Trekin, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU). Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Reinforced concrete and stone structures. Moscow, Russian Federation
e-mail: otks@yandex.ru

Авдеев Кирилл Владимирович, АО «ЦНИИПромзданий», главный инженер. Москва, Российская Федерация
e-mail: 6136133@mail.ru

Kirill V. Avdeev, Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions, chief engineer. Moscow, Russian Federation

e-mail: 6136133@mail.ru

Кодыш Вадим Эмильевич, АО «НИЦ «Строительство», кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. Москва, Российская Федерация

e-mail: entvacancy@mail.ru

Vadim E. Kodysh, Scientific Research Center «Construction». Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher. Moscow, Russian Federation

e-mail: entvacancy@mail.ru

Шмаков Сергей Дмитриевич, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)), аспирант, младший научный сотрудник отдела конструктивных систем № 1. Москва, Российская Федерация

e-mail: sergey3456789@gmail.com

Sergey D. Shmakov, Russian university of transport (MIIT). PhD student, Junior Researcher, Department of Structural Systems No. 1. Moscow, Russian Federation

e-mail: sergey3456789@gmail.com

Черепанов Андрей Викторович, АО «ЦНИИПромзданий», аспирант, ведущий инженер-конструктор отдела конструктивных систем № 2.

Москва, Российская Федерация

e-mail: a.cherepanov@cniipz.com

Andrey V. Cherepanov, Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions. PhD student, Lead Design Engineer of Structural Systems Department No. 2. Moscow, Russian Federation

e-mail: a.cherepanov@cniipz.com

Тучин Михаил Александрович, Заведующий сектором отдела конструктивных систем № 2,

e-mail: m.tuchin@cniipz.com

Mikhail A. Tuchin, Head of Sector, Department of Structural Systems No. 2,

e-mail: m.tuchin@cniipz.com

Чаганов Алексей Борисович, ФГБОУ ВО «Вятский Государственный Университет» (ВятГУ), кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительного производства. Киров, Российская Федерация

e-mail: chabpilot@yandex.ru

Aleksey B. Chaganov, Vyatka State University. Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department of Construction Production. Kirov, Russian Federation

e-mail: chabpilot@yandex.ru

УДК: 626/627.01.34.096

DOI: [10.37153/2618-9283-2023-4-59-83](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-59-83)

Проектирование, строительство и реконструкция сейсмостойких зданий и сооружений

Управление сроком эксплуатации гидротехнических сооружений гидроэлектростанций

Калиберда Инна Васильевна¹, Пименов Владимир Иванович²

¹ ФБУ «Научно-технический центр Энергобезопасность». Москва, Российская Федерация

² Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.
Москва, Российская Федерация

Аннотация.

Введение. В последние годы актуальным стал вопрос о необходимости принятия решений в отношении гидротехнических сооружений гидроэлектростанций (далее – ГТС ГЭС), находящихся на этапе эксплуатации, расчетный срок службы которых закончился.

Цель. Акцентировать внимание на отсутствии норм и правил установления назначенного срока эксплуатации гидротехнических сооружений, на важности обеспечения нормативного регулирования созданием правил для определения расчетного срока службы и назначенного срока эксплуатации, критериев возможности их продления, а также наметить оптимальный подход к управлению сроком эксплуатации гидротехнических сооружений гидроэлектростанций во время их эксплуатации.

Материалы и методы. Рассмотрены федеральные законы, иные нормативные правовые акты на предмет наличия в них положений и требований по назначению сроков службы, критериев возможности продления сроков службы ГТС объектов разного назначения, в том числе ГТС ГЭС. Согласно СП 58.13330.2019 «Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003» назначенный расчетный срок службы ГТС первого и второго классов составляет 100 лет, ГТС третьего и четвертого классов – 50 лет. Эта норма установлена в 2013 году. Изложены термины и определения срока службы, срока эксплуатации.

Результаты. Приводится аналитический обзор о состоянии нормативного обеспечения в Российской Федерации для целей определения срока эксплуатации ГТС ГЭС, информация о практике принятия решений за рубежом по управлению сроками эксплуатации на этапе эксплуатации ГТС, их консервации, реконструкции, ликвидации. Рассмотрен опыт управления сроками эксплуатации на атомных станциях. Сформулированы предложения по управлению сроками эксплуатации гидротехнических сооружений гидроэлектростанций, когда превышен назначенный расчетный срок службы ГТС ГЭС.

Выводы. Сформулированы предложения по обеспечению нормативного регулирования в целях

@ I.V. Kaliberda, V.I. Pimenov, 2023

определения срока эксплуатации, критериев возможности продления срока эксплуатации, а также управления назначенным сроком эксплуатации гидротехнических сооружений ГЭС в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, проектирование, эксплуатация, реконструкция, ликвидация, срок службы, срок эксплуатации, управление сроком эксплуатации, безопасность, нормативные документы

Для цитирования: Калиберда И.В., Пименов В.И. Управление сроком эксплуатации гидротехнических сооружений гидроэлектростанций // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 4. С. 59–83

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-59-83](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-59-83)

Design, building and reconstruction of a seismic constructions

Management of the period of operation of hydro engineering facilities of hydro power plants

Kaliberda Inna V.¹, Pimenov Vladimir I.²

¹Federal Budgetary Enterprise “Scientific and Engineering Centre for Energy Safety”.
Moscow, Russian Federation

²Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision.
Moscow, Russian Federation

Abstract.

Introduction. In recent years, the issue of the need to make decisions regarding hydraulic structures of hydroelectric power plants (hereinafter referred to as GTS HPP) that are in operation, the estimated service life of which has ended, has become relevant.

Aim. To focus attention on the lack of norms and rules for establishing the designated period of operation of hydraulic structures, on the importance of ensuring regulatory regulation by creating rules for determining the design service life and designated period of operation, criteria for the possibility of their extension, and also to outline an optimal approach to managing the period of operation of hydraulic structures of hydroelectric power plants during their operation.

Materials and method. Federal laws and other regulatory legal acts are considered for the presence in them of provisions and requirements for the purpose of service life and period of operation, criteria for the possibility of extending the designated period of operation of GTS facilities for various purposes, including GTS hydroelectric power plants. According to SP 58.13330.2019 "Hydraulic structures. The main provisions. Updated version of SNiP 33-01-2003" the assigned estimated service life of the first and second class GTS is 100 years, the third and fourth class GTS is 50 years. This norm was established in 2013. The terms and definitions of service life, designated period of operation.

Results. An analytical review is provided on the state of regulatory support in the Russian Federation in order to determine the rules for designate period of operation of hydraulic structures, information on the practice of decision-making abroad on managing the designated period of operation of hydraulic structures, their conservation, reconstruction or liquidation. The experience of managing the designated period of operation of nuclear power plants is considered. Proposals have been formulated for

managing the established period of operation of hydraulic structures of hydroelectric power stations when the service life of hydraulic structures of hydroelectric power stations is exceeded.

Conclusions. Proposals have been formulated to ensure regulatory regulation for the purpose of determining the period of operation, criteria for the possibility of extending the period of operation, and managing the designated period of operation of hydraulic structures of hydroelectric power stations during their operation.

Keywords: hydraulic structures, design, operation, reconstruction, liquidation, service life, designated period of operation, management of designated period of operation, safety, regulatory documents

For citation: I.V. Kaliberda, V.I. Pimenov Life management of hydro engineering facilities of hydro power plants. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 4, pp. 59–83. [In Russian]

DOI [10.37153/2618-9283-2023-4-59-83](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-4-59-83)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации комплексы гидротехнических сооружений (далее – ГТС) на многих гидравлических электрических станциях (далее – гидроэлектростанции, ГЭС) находятся в эксплуатации длительное время. Если основное оборудование ГЭС можно модернизировать или заменить, то проблема возможности бессрочной эксплуатации ГТС ГЭС не может быть решена без достаточных обоснований их безопасности, а в ряде случаев без необходимости проведения реконструкции ГТС. Вопрос о том, как долго можно продолжать безопасно эксплуатировать ГТС ГЭС, находящиеся длительное время в эксплуатации, в том числе ГТС третьего и четвертого классов некоторых ГЭС, которые эксплуатируются за пределами нормативно назначенных в последние годы расчетных сроков службы, является актуальным.

1. НОРМАТИВНАЯ БАЗА

Для выявления наличия положений и требований по назначению проектных (расчетных) сроков службы, сроков эксплуатации, критериев возможности продления сроков эксплуатации зданий и сооружений, в том числе ГТС ГЭС, оценки их достаточности был проведен обзор положений федеральных законов Российской Федерации, иных нормативных правовых актов, результаты которого описываются ниже.

Федеральный закон от 29 декабря 2004 года № 190-ФЗ «Градостроительный кодекс Российской Федерации»

Рассмотрены положения Градостроительного кодекса Российской Федерации (далее – ГК РФ) [1] в части, касающейся проектной документации, так как в проектной документации, по нашему мнению, должны (или могут) содержаться требования по наличию в ней сведений о проектном сроке службы сооружения.

Согласно статье 49 ГК РФ состав и требования к содержанию разделов проектной документации, устанавливаются Правительством Российской Федерации. В дефисах 1 – 3 статьи 49 ГК РФ изложены общие положения, которые должны учитываться при разработке проектной документации. Подготовка проектной документации осуществляется на основании задания застройщика или технического заказчика на проектирование. В составе проектной

документации должен быть проект организации строительства, в том числе по сносу объекта капитального строительства (применяется термин «снос», а не «ликвидация»). Проектная документация должна включать раздел «Смета на строительство, реконструкцию, капитальный ремонт, снос объекта капитального строительства». В пункте 4 устанавливаются особенности финансирования; в пункте 5 указывается на необходимость включать в состав проектной документации разделы проектной документации, предусмотренные федеральными законами, распространяющимися на опасные производственные объекты; особо опасные, технически сложные, уникальные объекты; объекты использования атомной энергии; объекты обороны и безопасности. В проектную документацию должны включаться перечни мероприятий по гражданской обороне, по предупреждению чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, по противодействию терроризму.

В постановлении Правительства Российской Федерации от 16 февраля 2008 года № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» (с изменениями на 6 мая 2023 года) изложены требования к составу и содержанию проектной документации, детализированные в отношении разных типов объектов капитального строительства.

Таким образом, состав и содержание проектной документации дифференцируются применительно к различным видам объектов капитального строительства, а также в зависимости от назначения объектов капитального строительства, видов работ (строительство, реконструкция, капитальный ремонт объектов капитального строительства), их содержания, источников финансирования работ и выделения отдельных этапов строительства, реконструкции. Проектная документация должна проходить государственную или негосударственную экспертизу.

В статье 49 ГК РФ вся ответственность за состав и содержание проектной документации, за внесение в неё изменений, проведение её экспертизы ложится на застройщика (технического заказчика). В то же время застройщик (технический заказчик) не имеют права на внесение изменений в проектную документацию после получения заключения органа государственного строительного надзора о соответствии построенного, реконструированного объекта капитального строительства требованиям проектной документации.

В статье 52 ГК РФ указывается, что строительство, реконструкция объектов капитального строительства, а также их капитальный ремонт «регулируются настоящим Кодексом, другими федеральными законами и принятыми в соответствии с ними иными нормативными правовыми актами Российской Федерации, договорами строительного подряда». «Отклонение параметров объекта капитального строительства от проектной документации, необходимость которого выявилась в процессе строительства, реконструкции, капитального ремонта такого объекта, допускается только на основании вновь утверждённой застройщиком, техническим заказчиком, лицом, ответственным за эксплуатацию здания, сооружения, или региональным оператором проектной документации после внесения в нее соответствующих изменений в соответствии с настоящим Кодексом, в том числе в порядке, предусмотренном частями 3.8 и 3.9 статьи 49 настоящего Кодекса». В статье 55.24 ГК РФ установлены требования к эксплуатации зданий, сооружений.

Анализ содержания Градостроительного кодекса Российской Федерации не выявил положений, касающихся установления сроков службы (сроков эксплуатации) зданий и сооружений. Из этого следует, что именно заказчик (застройщик) объекта капитального строительства определяет в техническом задании на проектирование условия и требования к объекту, к его эксплуатации. В целях обеспечения безопасности зданий, сооружений на этапе жизненного цикла – эксплуатация должны обеспечиваться техническое обслуживание зданий, сооружений, эксплуатационный контроль, текущий ремонт зданий, сооружений в целях обеспечения надлежащего технического состояния таких зданий, сооружений. Под надлежащим

техническим состоянием зданий, сооружений понимаются поддержание параметров устойчивости, надежности зданий, сооружений, а также исправность строительных конструкций, систем инженерно-технического обеспечения, сетей инженерно-технического обеспечения, их элементов в соответствии с проектной документацией.

Федеральный закон от 23 декабря 2009 г № 384-ФЗ «Технический регламент «О безопасности зданий и сооружений»

Федеральный закон от 23 декабря 2009 г № 384-ФЗ «Технический регламент «О безопасности зданий и сооружений (далее – Федеральный закон № 384-ФЗ) [2] был принят в 2009 году.

Обратимся первоначально к статье 42 «Заключительные положения» этого закона, так как это важно для понимания применения Федерального закона № 384-ФЗ к зданиям и сооружениям, находящимся в эксплуатации. В статье 42 установлено, что «Требования к зданиям и сооружениям, а также к связанным со зданиями и с сооружениями процессам проектирования (включая изыскания), строительства, монтажа, наладки, эксплуатации и утилизации (сноса), установленные настоящим Федеральным законом, не применяются вплоть до реконструкции или капитального ремонта здания или сооружения к следующим зданиям и сооружениям:

1) к зданиям и сооружениям, введенным в эксплуатацию до вступления в силу таких требований;

2) к зданиям и сооружениям, строительство, реконструкция и капитальный ремонт которых осуществляются в соответствии с проектной документацией, утвержденной или направленной на государственную экспертизу до вступления в силу таких требований;

3) к зданиям и сооружениям, проектная документация которых не подлежит государственной экспертизе и заявление о выдаче разрешения на строительство которых подано до вступления в силу таких требований.».

Таким образом, к находящимся в эксплуатации гидротехническим сооружениям, в том числе введенным в эксплуатацию до 2009 года, до принятия решения по изменению жизненного цикла с «эксплуатации» на «реконструкцию» требования этого закона не применяются.

Федеральный закон № 384-ФЗ не распространяется «на безопасность технологических процессов, соответствующих функциональному назначению зданий и сооружений. Учету подлежат лишь возможные опасные воздействия этих процессов на состояние здания, сооружения или их частей».

Объектом технического регулирования в Федеральном законе являются здания и сооружения любого назначения (в том числе входящие в их состав сети инженерно-технического обеспечения и системы инженерно-технического обеспечения), а также связанные со зданиями и с сооружениями процессы проектирования (включая изыскания), строительства, монтажа, наладки, эксплуатации и утилизации (сноса).

Как видим, применяется как и в Градостроительном Кодексе Российской Федерации термин «снос», «утилизация», а не «ликвидация», «вывод из эксплуатации», которые используются в других нормативных правовых актах Российской Федерации.

Ниже приводятся термины, включенные в Федеральный закон № 384-ФЗ в числе прочих терминов, которые в дальнейшем будут использоваться в настоящей статье.

Жизненный цикл здания или сооружения – период, в течение которого осуществляются инженерные изыскания, проектирование, строительство (в том числе консервация), эксплуатация (в том числе текущие ремонты), реконструкция, капитальный ремонт, снос здания или сооружения.

Предельное состояние строительных конструкций – состояние строительных конструкций здания или сооружения, за пределами которого дальнейшая эксплуатация здания или сооружения опасна, недопустима, затруднена или нецелесообразна либо восстановление работоспособного состояния здания или сооружения невозможно или нецелесообразно.

Сооружение – результат строительства, представляющий собой объемную, плоскостную или линейную строительную систему, имеющую наземную, надземную и (или) подземную части, состоящую из несущих, а в отдельных случаях и ограждающих строительных конструкций и предназначенную для выполнения производственных процессов различного вида, хранения продукции, временного пребывания людей, перемещения людей и грузов.

Строительная конструкция – часть здания или сооружения, выполняющая определенные несущие, ограждающие и (или) эстетические функции.

Уровень ответственности – характеристика здания или сооружения, определяемая в соответствии с объемом экономических, социальных и экологических последствий его разрушения.

Далее рассмотрим положения и требования Федерального закона № 384-ФЗ, чтобы выявить требования, которые имеют отношение к срокам службы (срокам эксплуатации) зданий и сооружений.

В статье 4 Федерального закона № 384-ФЗ перечислены признаки для идентификации зданий и сооружений. В их числе следующие признаки: назначение; принадлежность к объектам транспортной инфраструктуры и к другим объектам, функционально-технологические особенности которых влияют на их безопасность; возможность опасных природных процессов и явлений и техногенных воздействий на территории, на которой будут осуществляться строительство, реконструкция и эксплуатация здания или сооружения; принадлежность к опасным производственным объектам; пожарная и взрывопожарная опасность; наличие помещений с постоянным пребыванием людей; уровень ответственности.

В результате идентификации здания или сооружения по признаку «уровень ответственности» здание или сооружение должно быть отнесено к одному из следующих уровней ответственности: повышенный; нормальный; пониженный. Приводится пояснение для определения уровня ответственности. Этими идентификационными признаками должен руководствоваться застройщик (технический заказчик) при подготовке задания на выполнение инженерных изысканий для строительства здания или сооружения и задания на проектирование. Идентификационные признаки должны использоваться также лицом, осуществляющим подготовку проектной документации, в текстовых материалах в составе проектной документации, передаваемой по окончании строительства на хранение собственнику здания или сооружения.

Согласно статье 15 «Общие требования к результатам инженерных изысканий и проектной документации» в проектной документации в составе исходных данных для проектирования должен быть указан уровень ответственности проектируемого здания или сооружения. Проектная документация здания или сооружения должна использоваться в качестве основного документа при принятии решений об обеспечении безопасности здания или сооружения на всех последующих этапах жизненного цикла здания или сооружения.

В статье 16 «Требования к обеспечению механической безопасности здания или сооружения» установлено, что выполнение требований механической безопасности в проектной документации здания или сооружения должно быть обосновано расчетами и иными способами, подтверждающими, что в процессе строительства и эксплуатации здания или сооружения его строительные конструкции и основание не достигнут предельного состояния по прочности и устойчивости при учитываемых вариантах одновременного действия нагрузок и воздействий. Приводится список предельных состояний строительных конструкций и основания по

прочности и устойчивости. В этом списке четыре состояния: разрушение любого характера; потеря устойчивости формы; потеря устойчивости положения; нарушение эксплуатационной пригодности с угрозой причинения вреда жизни и здоровью людей, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений. При этом в процессе обоснования выполнения требований механической безопасности должны быть учтены следующие расчетные ситуации:

1) установившаяся ситуация, имеющая продолжительность того же порядка, что и срок эксплуатации здания или сооружения, в том числе эксплуатация между двумя капитальными ремонтами или изменениями технологического процесса;

2) переходная ситуация, имеющая меньшую по сравнению со сроком эксплуатации здания или сооружения продолжительность, в том числе строительство, реконструкция, капитальный ремонт здания или сооружения.

Как видим, в статье 16 имеется обращение к «сроку эксплуатации здания или сооружения» на этапе жизненного цикла – эксплуатация.

Расчеты, обосновывающие безопасность принятых конструктивных решений здания или сооружения, должны быть проведены с учетом уровня ответственности проектируемого здания или сооружения. С этой целью расчетные значения усилий в элементах строительных конструкций и оснований здания или сооружения должны быть определены с учетом коэффициента надежности по ответственности, которое не должно быть ниже для зданий и сооружений повышенного уровня ответственности – 1,1; для зданий и сооружений нормального уровня ответственности – 1,0; для зданий и сооружений пониженного уровня ответственности – 0,8.

В статье 33 Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» изложены требования к предупреждению действий, вводящих в заблуждение приобретателей. В этой статье указывается, что в целях предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей, в проектной документации здания или сооружения должна содержаться следующая информация: идентификационные признаки здания или сооружения; срок эксплуатации здания или сооружения и их частей; показатели энергетической эффективности здания или сооружения; степень огнестойкости здания или сооружения.

Как видим, в статье 33 установлено, что в проектной документации должен быть указан «срок эксплуатации здания или сооружения и их частей».

В статье 38 Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» изложены общие положения для оценки соответствия зданий и сооружений, а также связанных со зданиями и с сооружениями процессов проектирования (включая изыскания), строительства, монтажа, наладки, эксплуатации и утилизации (сноса). В их числе требования о получении подтверждений о соответствии проектной документации результатов инженерных изысканий; характеристик здания или сооружения, строительство которых завершено, перед вводом здания или сооружения в эксплуатацию.

Также установлено требование о проведении периодического удостоверения соответствия характеристик эксплуатируемого здания или сооружения требованиям этого Федерального закона и проектной документации для подтверждения возможности дальнейшей эксплуатации здания или сооружения.

Таким образом, Федеральный закон от 23 декабря 2009 г № 384-ФЗ «Технический регламент «О безопасности зданий и сооружений» содержит требование об указании срока эксплуатации здания, сооружения, его частей. И это является ответственностью застройщика, заказчика и проектной организации, осуществляющей разработку проекта. Также следует обратить внимание на то, что в статье 16 Федерального закона № 384-ФЗ даны определения «установившейся ситуации» и «переходной ситуации», продолжительность которых в неявном

виде назначается через «сроки эксплуатации». Но напомним, что в соответствии со статьёй 42 Федерального закона № 384-ФЗ требования этого закона не применяются «вплоть до реконструкции или капитального ремонта здания или сооружения».

Нужно полагать, что срок эксплуатации для находящихся в эксплуатации ГТС, входящих в состав комплекса ГТС ГЭС, не устанавливался или устанавливался проектировщиком для проведения в отношении них расчетных обоснований предполагая, что в продолжении какого-то периода эксплуатации сооружение или его части не достигнут предельных состояний. Но после реконструкции согласно Федеральному закону № 384-ФЗ срок эксплуатации должен быть определён и установлен «в целях предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей».

СП 255.1325800.2017. «Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения»

В 2016 году был разработан СП 255.1325800.2017. «Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения» и введен в действие с 25 февраля 2017 г. [3]. Его целью является нормативное обеспечение разделов по эксплуатации Федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент по безопасности зданий и сооружений».

В этом Своде правил приводится термин «расчетный срок службы» и дано его определение.

«Расчетный срок службы: установленный в строительных нормах или в задании на проектирование период использования строительного объекта по назначению до капитального ремонта и (или) реконструкции с предусмотренным техническим обслуживанием. Расчетный срок службы отсчитывается от начала эксплуатации объекта или возобновления его эксплуатации после капитального ремонта или реконструкции.» (пункт 3.9. СП 255.1325800.2017).

В пунктах 5.7 и 5.8. СП 255.1325800.2017 приводятся рекомендации по установлению расчетных сроков службы. Там же в таблице 5.1. приводятся рекомендуемые сроки службы зданий (сооружений), которые должны быть определены генпроектировщиком по согласованию с заказчиком. При этом примерные расчетные сроки службы для производственных зданий и сооружений могут быть не менее 50 лет, а для уникальных сооружений могут быть от 100 лет и выше.

В пункте 6.3 СП 255.1325800.2017 также записано, что раздел проектной документации «Требования к безопасной эксплуатации объекта капитального строительства» должен содержать сведения «о сроках эксплуатации здания или сооружения и его частей». Следует обратить внимание на то, что речь идёт о сроках эксплуатации. Также в пункте 8.4 раздела «Организационные основы эксплуатационного контроля» записано, что «комплексные обследования технического состояния зданий (сооружений) дополнительно проводят «по истечении нормативных сроков эксплуатации зданий (сооружений)». В пункте 8.4 перечисляются и другие причины, которые обязывают проводить комплексные обследования.

Согласно пункту 9.3 СП 255.1325800.2017 рекомендуется использовать два основных метода обслуживания: по ресурсу (профилактическое обслуживание) и по состоянию (предупредительное обслуживание). В приложении Б приводится информация для выбора метода обслуживания с целью обеспечения безопасности с учетом преимуществ и недостатков каждого из методов. В приложении «Г» СП 255.1325800.2017 дана информация о продолжительности эффективной эксплуатации зданий (сооружений), при этом наибольшая продолжительность составляет 20–25 лет. Означает ли это, что по истечению этих сроков

должны приниматься меры по продлению сроков эксплуатации, если это может быть обосновано доказательствами безопасности.

СП 58.13330.2019. «Свод правил. Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 33-01-2003»

Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» был принят 30 декабря 2009 года, введён в действие в 2010 году. В пункте 5 статьи 42 этого федерального закона установлено, что уполномоченный федеральный орган исполнительной власти не позднее 1 июля 2012 года осуществляет актуализацию строительных норм и правил, признаваемых в соответствии с настоящим Федеральным законом сводами правил и включенных в утверждаемый Правительством Российской Федерации и указанный в части 1 статьи 6 настоящего Федерального закона перечень национальных стандартов и сводов правил.

В связи с этим требованием были внесены в СП 58.13330.2012 «Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003» изменения и дополнения, в том числе касающиеся установления расчетных сроков службы гидротехнических сооружений. В главу 8 «Основные расчетные положения», в раздел «Обоснование надежности и безопасности гидротехнических сооружений» СП 58.13330.2012 был включен пункт 8.20 следующего содержания. «Гидротехнические сооружения, их конструкции и основания, как правило, надлежит проектировать таким образом, чтобы условие недопущения наступления предельных состояний соблюдалось на всех этапах строительства и эксплуатации, в том числе и в конце расчетного срока их службы. Расчетные сроки службы основных гидротехнических сооружений гидроузла в зависимости от их класса должны приниматься равными: для сооружений I и II классов – 100 лет; III и IV классов – 50 лет».

В 2019 году была введена в действие актуализированная редакция СП 58.13330.2019 «Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003» [4], в котором пункт 8.20 переместился в пункт 8.21. Изложенные в этом пункте положения уточнены и дополнены. Но они также распространяются на этап «проектирование». Заменён «класс» ГТС на «класс ответственности» ГТС.

В пункте 8.21. установлено следующее. «Расчетные сроки службы основных гидротехнических сооружений в зависимости от их класса ответственности следует принимать (если иное не определено в задании на проектирование) равными:

- для сооружений I и II классов ответственности – 100 лет;
- для сооружений III и IV классов ответственности – 50 лет».

В этом пункте также установлена возможность уменьшать при проектировании при надлежащем технико-экономическом обосновании назначенный срок службы отдельных конструкций и элементов сооружения, разрушение которых не влияет на сохранность основных сооружений. В проектной документации должны быть предусмотрены технические решения, обеспечивающие восстановление разрушенных и ремонт поврежденных конструкций и элементов сооружения. «Не менее чем за два года до истечения расчетного срока службы сооружения собственник (эксплуатирующая организация) должен выполнить работы по всестороннему обследованию его состояния и, при необходимости, по разработке проектной документации усиления (реконструкции) объекта или его ликвидации».

Однако согласно Федеральному закону «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» в его заключительных положениях в статье 42 указывается, что требования этого закона не применяются «вплоть до реконструкции или капитального ремонта здания или сооружения». Поэтому установление сроков службы в 100 лет и 50 лет в зависимости от класса

ответственности не могут быть применены для большого числа ГТС ГЭС, находящихся в эксплуатации, тем более в длительной эксплуатации.

В Своде правил СП 58.13330.2019 не указывается, как применять «расчетный срок службы»: для отдельного ГТС или для каскада ГТС. Расчетный срок службы применим для целей проектирования, когда для каждого ГТС необходимо обеспечить его частям (элементам) и ГТС в целом нормативно установленный расчетный срок службы, хотя «допускается уменьшать при проектировании при надлежащем технико-экономическом обосновании назначенный срок службы отдельных конструкций и элементов сооружения, разрушение которых не влияет на сохранность основных сооружений».

Однако на этапах жизненного цикла объекта разные ГТС имеют разные условия эксплуатации, поэтому их ресурсы расходуются также не одинаково. В результате фактические сроки службы разных ГТС могут отличаться от расчетных сроков службы (для первого и второго классов ответственности – 100 лет, для третьего и четвертого класса ГТС – 50 лет).

В СП 58.13330.2019 отсутствуют положения о возможности продления срока безопасной эксплуатации ГТС ГЭС, как управлять сроками службы находящихся в эксплуатации ГТС и вновь проектируемых ГТС.

Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений»

В 1997 году был принят и введен в действие Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» (далее – Федеральный закон № 117-ФЗ) [5], в котором установлены положения и нормы, направленные на обеспечение безопасности ГТС. Для гидротехнических сооружений в соответствии с Федеральным законом № 117-ФЗ эксплуатирующей организацией (собственником) осуществляется декларирование безопасности не реже одного раза в 5 лет, по результатам которого орган государственного надзора в области безопасности ГТС осуществляет выдачу разрешения на эксплуатацию (лицензию). Лицензионный срок указывается в разрешении на эксплуатацию ГТС и означает календарный период времени, по истечении которого безопасность эксплуатации ГТС должна быть снова подтверждена. В Федеральном законе № 117-ФЗ не содержится упоминаний о проектном (расчетном) сроке эксплуатации, а также положений, касающихся установления и применения на этапе эксплуатации ГТС ГЭС требований, ограничивающих эксплуатацию ГТС за пределами их расчетного срока службы.

В Федеральном законе № 117-ФЗ (редакция, утвержденная Федеральным законом от 29 мая 2023 г. № 191-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений») также отсутствуют положения, касающиеся срока службы (срока эксплуатации) ГТС и его контроля при эксплуатации ГТС. Введен термин «гидроузел - комплекс гидротехнических сооружений, объединённых по расположению и совместному функционированию в соответствии с проектной документацией». Это является полезным, так как безопасность ГТС на ГЭС является интегральной, обеспеченной безопасностью ГТС, составляющих комплекс ГТС, что также важно при определении срока эксплуатации не одного ГТС, а комплекса ГТС на гидроузле. Также установлено, что проектирование, строительство и реконструкция гидротехнических сооружений осуществляется в соответствии с проектной документацией, разработанной с учетом класса ответственности гидротехнических сооружений, устанавливаемого в соответствии с законодательством о техническом регулировании.

В статью 2 «Законодательство о безопасности гидротехнических сооружений» внесено изменение, касающееся введения нового типа нормативных правовых актов федеральных органов исполнительной власти – федеральных норм и правил в области безопасности

гидротехнических сооружений, которые устанавливают обязательные требования. В их числе обязательные требования к безопасности технологических процессов при эксплуатации гидротехнических сооружений, за исключением требований, предъявляемых к безопасности технологических процессов, протекающих в основном и во вспомогательном оборудовании объектов электроэнергетики, урегулированных требованиями к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики.

В связи с этим, оборудование ГЭС (основное и вспомогательное) должно эксплуатироваться в соответствии с Федеральным законом от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике». Гидротехнические сооружения обеспечивают эксплуатацию оборудования с целью выработки электрической энергии. Из этого следует, что гидроузел в целом должен эксплуатироваться в соответствии с Федеральным законом № 117-ФЗ [5] и Федеральным законом от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» [6].

Федеральный закон от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике»

В результате рассмотрения содержания Федерального закона от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» (далее – Федеральный закон № 35-ФЗ) [6] не выявлено положений, содержащих применение терминов «срок службы», «срок эксплуатации» для объектов электроэнергетики, их конструкций и частей. Также отсутствуют ссылки на проектирование и строительство объектов электроэнергетики, включая гидроэлектростанции, что, соответственно, указывает на то, что проектирование и строительство должны осуществляться в соответствии с положениями Градостроительного кодекса Российской Федерации и Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Об этом также указывается в статье 42, в которой установлено, что «государственная экспертиза проектной документации объектов электроэнергетики, являющихся объектами капитального строительства, и государственный строительный надзор за строительством, реконструкцией, капитальным ремонтом этих объектов осуществляются в соответствии с законодательством Российской Федерации о градостроительной деятельности».

В Федеральном законе № 35-ФЗ содержатся положения по осуществлению деятельности при эксплуатации объектов электроэнергетики в большинстве случаев организационного и экономического характера. Уделяется внимание деятельности по «выводу в ремонт и из эксплуатации».

В Федеральном законе «Об электроэнергетике», отсутствуют какие-либо ссылки, касающиеся вывода из эксплуатации объекта электроэнергетики по причине превышения проектного срока службы (срока эксплуатации) основного оборудования и (или) комплекса гидротехнических сооружений, которые входят в состав гидроузла и являются основными компонентами объекта по производству электрической энергии.

В пункт 2 статьи 28 Федерального закона № 35-ФЗ включен в состав нормативных правовых актов наравне с другими типами документов тип документов «требования к безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок».

В отношении основного оборудования ГЭС разработан нормативный документ «СТО РусГидро 02.03.77-2015 «Гидроэлектростанции. Продление срока службы основного оборудования в процессе эксплуатации. Нормы и требования»» [7].

Но отсутствуют нормы и правила для обеспечения на этапе эксплуатации безопасности ГЭС, в состав которой входят основное оборудование, комплекс ГТС и обслуживающее ГТС гидромеханическое оборудование, работающие в составе единого технически сложного объекта, для которого необходимо установить требования к сроку службы (сроку эксплуатации),

его подтверждению на этапе эксплуатации и к оценке возможности продления срока эксплуатации.

2. НАЗНАЧЕНИЕ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНОГО ОБЪЕКТА

Обзор положений и требований нормативной базы федерального уровня и иных нормативных правовых актов, распространяющихся на здания, сооружения, в том числе на ГТС ГЭС, показал, что отсутствует нормативная основа для назначения срока службы технически сложного объекта даже для вновь проектируемых зданий и сооружений. Конечно, существует практика, но она не нашла отражения в источниках информации. Всё решает заказчик проекта.

Поэтому целесообразно рассмотреть вопрос о том, как определяется (определялся) назначенный (нормативный, проектный, расчетный) срок службы и назначенный (нормативный, проектный, расчетный) срок эксплуатации при проектировании технически сложных объектов, включая ГЭС с комплексом ГТС. Являются ли эти термины и их понятия одинаковыми?

В стандарте ГОСТ Р - 53480 2009 (в 2022 году утратил силу в Российской Федерации) [8] приводятся термины и их определения в области надёжности, в число которых входят понятия амортизационного срока, гарантийного срока, срока службы, срока эксплуатации устройств (оборудования, объектов). В связи с тем, что иного стандарта не имеется, рассмотрим приведенные в нём термины, чтобы понять, как эти термины могли использоваться при проектировании объектов, находящихся уже длительное время в эксплуатации.

Амортизационный срок (период) — это срок возмещения стоимости основных фондов. Сюда входят все затраты, которые были понесены при создании объекта (продукции) до момента ввода в эксплуатацию, включая доставку, страхование в пути, растаможку, разгрузку, пуско-наладочные работы. Не входят НДС и акцизы.

У каждого объекта и у каждой продукции состав основных фондов различается. Поэтому у каждого вида основных фондов имеется свой период амортизации, в течение которого собственная стоимость объекта переносится на производимые с его помощью товары (продукцию), например для ГЭС – стоимость электрической энергии. По окончании такого периода организация должна накопить средства для технического перевооружения, финансовые средства для их восстановления или замены. По общему правилу амортизация начисляется только в период эксплуатации объекта. Годовая норма расчета амортизации оборудования исчисляется следующим образом:

$$A_{г} = ((\Phi - \Phi_{л}) / T_{н} \Phi) \times 100,$$

где: $A_{г}$ – годовая норма амортизации (в процентах);

$T_{н}$ – нормативный срок службы (в годах);

Φ – первоначальная стоимость объекта, отраженная в балансе.

Стоимость объекта определяется на дату его введения в эксплуатацию. Она состоит из цены приобретения, затрат на доставку и монтаж, последующих расходов на реконструкцию, модернизацию или расширение (в рублях);

$\Phi_{л}$ – ликвидационная стоимость объекта. Этот параметр отражает предполагаемую выручку от реализации объекта учета, либо его остатков после окончания срока эксплуатации (в рублях).

Установлено 10 групп амортизации оборудования (объекта), для которых определяется срок службы от 2-х до 30-ти лет и выше. Для ГТС наиболее подходящими являются группы № 9 и № 10.

Группа № 9 – время полезного использования объекта 25–30 лет соответствует зданиям с железобетонными перекрытиями, керамическим сетям, каменным хранилищам, очистным сооружениям.

Группа № 10 – время полезного использования объекта свыше 30 лет – самый долгий период использования принадлежит жилым зданиям, а также нежилым объектам капитального строительства, лесозащитным полосам и некоторым видам многолетних посадок деревьев.

Процедура определения амортизационного срока описана с использованием информации, опубликованной в журнале «Генеральный директор» [9].

Можно заключить, что амортизационный срок рассматривается как срок службы (срок эксплуатации). Чем длительнее этот срок, тем при прочих равных условиях меньше сумма ежегодных амортизационных отчислений и наоборот. Однако амортизационный срок имеет, в основном, экономический характер. И продолжительность расчетного срока службы для целей определения амортизационного срока определяется заказчиком с учетом возможностей и интересов заказчика. Поэтому можно предположить, что расчетный срок службы для объектов в проектной документации принят согласно расчетам амортизационных отчислений.

Рассмотрим другие термины и определения, которые приведены в иных источниках. В частности, что следует понимать под гарантийными сроками эксплуатации? Эти гарантийные сроки должны устанавливаться в технических заданиях или в технических условиях.

В результате поиска обнаружено несколько редакций определений этого термина в нормативных правовых актах. Ниже приводятся два определения.

Гарантийный срок – срок, в течение которого поставщик обязуется обеспечить соответствие качества товара условиям договора и несет ответственность перед покупателем за выявленные недостатки товара (п. 2 ст. 470, п. 3 ст. 477 Гражданского кодекса Российской Федерации от 26 января 1996 г. № 14-ФЗ).

Гарантийный срок эксплуатации – период времени, в течение которого изготовитель гарантирует стабильность показателей качества продукции в процессе эксплуатации при условии соблюдения потребителем правил эксплуатации (Федеральный закон от 7 февраля 1992 г. № 2300-1 «О защите прав потребителей», части 1–6 статьи 5).

Срок эксплуатации – временной интервал, в ходе которого свойства и стабильная эксплуатация продукции обеспечиваются изготовителем (Федеральный закон от 7 февраля 1992 г. № 2300-1 «О защите прав потребителей», статьи 10, 19).

Срок службы – это период, в течение которого изготовитель обязуется обеспечивать потребителю возможность использования товара по назначению и нести ответственность за существенные недостатки. Срок службы устанавливается изготовителем и начинает действовать со дня приобретения товара, при этом продавец обязан довести информацию до потребителя об установленном изготовителем сроке службы товара (Федеральный закон от 7 февраля 1992 г. № 2300-1 «О защите прав потребителей», статьи 10 и 19).

Эти термины наиболее применимы к продукции и работам. Можно ли их применить для объектов?

Для технически сложных объектов с целью прогноза гарантийных сроков эксплуатации предлагается руководствоваться понятиями, изложенными в ГОСТ Р 27.101-2021 [10], в котором установлены термины: объект, система, элемент, надёжность объекта. Эти термины и понятия приводятся ниже.

Объектом могут быть аппаратные средства, программное обеспечение, сооружения или их комбинации. Объект может включать в себя персонал. Объектом может быть сборочная единица, деталь, компонент, элемент, устройство, функциональная единица, оборудование, изделие, система, сооружение.

Система – объект, представляющий собой множество взаимосвязанных элементов, рассматриваемых в определенном контексте как единое целое, отделенное от окружающей среды.

Элемент – объект, у которого отсутствуют (или в рамках данного исследования не рассматриваются) составные части.

Надежность объекта – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях технического обслуживания, хранения и транспортирования.

В состав технически сложного объекта входят разные компоненты, состоящие из систем и элементов. При проектировании технически сложного объекта каждому из его компонентов назначается гарантийный срок эксплуатации с учетом возможных проектных воздействий на него. При этом гарантийный срок каждой из компонентов устанавливается по минимальному гарантийному сроку входящих в его состав систем и элементов. А на основании знаний о гарантийных сроках эксплуатации компонентов, их влияния на надёжность объекта определяется гарантийный срок эксплуатации объекта – t_g . Также назначается гарантийная приработка t_p , соответствующая минимальному сроку эксплуатации, на протяжении которого осуществляется проверка и подтверждение работоспособности компонентов в заданных проектной документацией режимах эксплуатации технически сложного объекта. При эксплуатации в компонентах объекта с определённого времени t_c проявляются признаки старения, которые начинают прогрессировать.

Продолжительность гарантийного срока эксплуатации t_g выбирается из экономических соображений на отрезке между t_p и t_c так, чтобы продолжительность гарантийного срока была бы не менее периода приработки. Для ответственных объектов с высокими требованиями к безотказности нормативная вероятность безотказной работы их критически важных компонентов должна равняться 0,9999 и выше; наступление критического отказа должно быть маловероятным событием.

При нормировании надёжности технически сложного объекта проводится выбор номенклатуры всех показателей надёжности и задание численных значений этих показателей для компонентов объекта.

Показатель долговечности любого из компонентов сложной технической системы определяется гамма процентным сроком службы T_γ , который измеряется в единицах календарного времени, соответствующего в процентах вероятности того, что в течение этого срока предельное состояние у любого из компонентов не наступит. Второй показатель – это гамма процентный ресурс L_γ . Гамма процентный ресурс L_γ выражается в единицах наработки, соответствующего в процентах вероятности того, что в течение этой наработки предельное состояние у компонента не будет достигнуто. Вероятность γ находится по результатам технико-экономического анализа как относительная доля тех компонентов, которые не достигают предельного состояния до истечения данной календарной продолжительности эксплуатации (данной наработки).

Для уникальных объектов вероятность не наступления предельного состояния объекта находится в пределах 90 – 95 %. Для иных объектов вероятность не наступления предельного состояния объекта находится в интервале 60–80 %. Если скорость приближения объекта к предельному состоянию не зависит от наработки, то нормированию подлежит срок службы T_γ . Если скорость приближения объекта к предельному состоянию зависит от наработки, то нормированию подлежит ресурс L_γ .

При наличии ограничений по безопасности или моральному износу в число нормируемых показателей включается назначенный срок службы T_n или назначенный ресурс

L_n . Если назначенный срок службы или назначенный ресурс устанавливаются по соображениям безопасности, то их определяют как срок службы (ресурс), отвечающий пренебрежимо малой вероятности возникновения опасных ситуаций.

Нормативные значения риска $Q = 1 - P$ регламентируются нормами безопасности.

При невозможности оценки столь малых вероятностей вводятся понижающие коэффициенты к T_n и (или) L_n , которые являются коэффициентами безопасности по сроку эксплуатации (ресурсу).

В статье [11] рассмотрены термины «гарантийный срок», «срок службы» и «срок эксплуатации», другие термины в приложении к блоку атомной электрической станции, как технически сложного объекта.

Методология управления сроком эксплуатации находящегося в эксплуатации блока АЭС за пределами проектного срока эксплуатации основывается на том, что решение о продолжении эксплуатации возможно в том случае, если на действующей АЭС обеспечивается поддержка необходимого уровня безопасности в дополнительный срок эксплуатации [11]. При этом дополнительный срок эксплуатации назначается, исходя из представления о возможных средних значениях (\bar{T}_n), относящихся к каждому оборудованию, сооружению АЭС. Оптимальный срок эксплуатации объекта определяется термином \bar{T}_n важного незаменимого (условно незаменимого) оборудования (например, реактора).

Но \bar{T}_n условно незаменимого оборудования и объекта в целом может быть превышено, если применяется регулирование их ресурсных характеристик:

$$\bar{T}_n + \Delta T < T,$$

где T – срок эксплуатации до предельного состояния наиболее критичного условно незаменимого оборудования;

ΔT – дополнительный срок эксплуатации наиболее критичного условно незаменимого оборудования.

Дополнительный срок эксплуатации объекта в связи с применением информации, получаемой при проведении оценок остаточных ресурсов у важных для безопасности систем и элементов, оборудования, конструкций и ранжированной по степени рисков возможного приближения их состояния к предельным состояниям, проведением восстановительных мероприятий, может назначаться пошагово из нескольких дополнительных периодов: ΔT_1 , ΔT_2 и т.д.

Тогда дополнительный срок эксплуатации составит:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2.$$

Назначенный (проектный) срок эксплуатации объекта ниже назначенного проектного срока службы и назначенного ресурса. Поэтому управлять можно назначенным сроком эксплуатации объекта.

3. ОБ УПРАВЛЕНИИ СРОКАМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ

Проведенный поиск источников информации о назначении сроков эксплуатации сложных технических объектов, к которым относятся атомные электрические станции (далее – АЭС, АС), подтвердил их отсутствие. Не была найдена информация о зарубежной и отечественной практике по продлению сроков эксплуатации блоков атомных станций и о наличии правовых основ для этой деятельности.

В результате обсуждений и дискуссий ученых и специалистов научных и проектно-конструкторских организаций, осуществляющих деятельность в области использования атомной

энергии, была одобрена гипотеза, что расчетный срок эксплуатации блока АС мог быть назначен как период, соответствующий амортизационному сроку эксплуатации. В конце 2000-х годов, когда срок эксплуатации некоторых блоков АЭС приближался к 30-ти годам, вопрос о необходимости принятия решения о продлении эксплуатации блока АС стал актуальным. Проводились обсуждения этого вопроса в Международном агентстве по атомной энергии (МАГАТЭ), чтобы получить информацию о практике назначения сроков эксплуатации атомных станций за рубежом. Был разработан национальный проект МАГАТЭ «*RUS/9/003*. Разработка основы регулирования для продления/возобновления лицензий на эксплуатацию АС». В работах [11, 12, 13, 14] изложены основные подходы продления срока эксплуатации блоков атомных станций. Эта деятельность основана на детальном исследовании технического состояния важных для безопасности систем и элементов, включая реактор, другое основное оборудование блока АЭС, оценках их остаточных ресурсов, а также факторов, процессов и явлений природного и техногенного характера (происхождения), которые могут оказать влияние на безопасность блока АЭС. К настоящему времени накоплен практический опыт этой деятельности.

Проектный (базовый) срок эксплуатации блока АЭС был принят равным 30 лет. Выполняемые за пределами 30-летнего периода эксплуатирующими организациями исследования и обоснования безопасности блока АЭС обеспечивают достаточной информацией для создания базы знаний, необходимой для управления дополнительными сроками эксплуатации.

Действующие федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии устанавливают такие правила управления сроком эксплуатации блока АЭС [15].

В настоящее время некоторые блоки атомных станций эксплуатируются надёжно уже за пределами 40 лет. Для новых блоков атомных станций назначаются сроки эксплуатации, равные 40 годам. Но для них также может по истечению 40 лет эксплуатации применяться методология поэтапного (пошагового) назначения дополнительных сроков эксплуатации.

4. ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ УПРАВЛЕНИЯ СРОКАМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРОСООРУЖЕНИЙ

Согласно данным из зарубежных источников, вопрос об экономической целесообразности продления срока эксплуатации гидросооружения, находящегося в эксплуатации длительное время, решает, главным образом, его владелец, исходя из соображений возможности выгодоприобретения от продолжения использования ГТС.

Продолжение эксплуатации ГТС всегда обеспечивается социальной ответственностью владельца объекта по соблюдению им прав и безопасности населения региона размещения ГТС и окружающей среды. Если экономическая целесообразность владельцем объекта установлена, изучается техническая возможность продолжения эксплуатации ГТС. С этой целью проводится комплексное обследование физического (технического) состояния объекта с использованием современных методов диагностики для определения потенциального ресурса ГТС. Изучается исходная проектная документация, определяется степень соответствия проектных параметров и физического состояния ГТС современным критериям безопасности и решается вопрос о сохранении существующего сооружения, опять же с учётом экономической целесообразности приведения его в соответствие современным критериям безопасности, либо о его ликвидации. Сюда относятся вопросы страхования гражданской ответственности за причинение вреда в результате аварии на ГТС, а также организация системы мониторинга состояния плотин и окружающей среды, оповещения населения в случае угрозы или реальной опасности

наводнения, а также ликвидации последствий произошедших аварий с разрушением плотин и затоплением территорий.

Мнения крупных зарубежных менеджеров относительно перспектив дальнейшего использования гидроэнергетических объектов, находящихся в длительной эксплуатации, очевидны. Они заключаются в том, что для целей обеспечения электроэнергией актуально решение вопроса об обоснованном принятии решения о продлении сроков эксплуатации ГЭС ГЭС, тем более, что достаточно успешно проводится модернизация на ГЭС по замене основного оборудования ГЭС.

Швейцарские специалисты [16] полагают, что основными факторами, влияющими на срок службы плотин, и которые могут потребовать её модернизации, являются перечисленные ниже факторы А, Б, В, Г.

А. Изменения проектных критериев (главным образом, касающихся гидрологической и сейсмической безопасности), которые вносятся как результат накопления новой информации, полученной с момента разработки первоначального проекта плотины.

Б. Изменения в методах выполнения анализа и новая концепция безопасности (к примеру, в отношении установок по сбросу избыточной воды для насыпных дамб).

В. Результаты переоценки риска (учёт появления новых рисков и изменения в части критериев приемлемости риска).

Г. Старение строительных конструкций, материалов и элементов основания плотины.

Одним из важных аспектов безопасности является старение бетона и основания скального фундамента плотины. Причины старения следующие:

- химические процессы (разбухание из-за карбонизации бетона вследствие совокупной щелочной реактивности, сульфатная атака, выщелачивание);
- физические и механические процессы (циклы оттаивание-замерзание, осушение-увлажнение, растрескивание из-за сейсмических явлений или непредусмотренных проектом перемещений основания и т.д.);
- биологические процессы (образование растительности в трещинах, появление моллюсков и т.д.);
- фильтрация в основании и теле плотины (разложение материалов на составляющие, ослабление конгломерата, изменение противодавления основания плотины и в результате изменения в стабильном состоянии плотины и береговых устоев).

Контроль процесса старения должен сопровождаться периодическими визуальными инспекциями, тестированиями и мониторингом состояния плотины. Однако, как выясняется из опыта эксплуатации, не всё оказывается видимым или измеряемым [16].

В статьях [16,17] сообщается, что в 2005 году швейцарскими экспертами Гизеке и Мосони были опубликованы данные по продолжительности сроков службы строительных конструкций, сооружений и их элементов, оборудования, других компонентов гидроэлектростанций. Так, по их наблюдениям, при соблюдении необходимых условий эксплуатации и техобслуживания, к примеру, отсечной клапан может прослужить до 60 лет, тогда как основные стационарные части турбины ГЭС, электрокабели, аварийный дизель-генератор, повышающий трансформатор – только 50 лет.

Основание плотины является настолько жизненно важным элементом с точки зрения продолжительности жизни всей строительной конструкции плотины, насколько важна и сама конструкция плотины. Насыпная плотина, если она хорошо спроектирована и построена, может оставаться конструкционно стабильной и безопасной на протяжении веков, до тех пор, пока она не подвергнется процессам эрозии. На срок службы насыпных плотин существенно влияют наводнения. В некоторых случаях экономически продуктивная часть жизни проекта водохранилища может определяться иными факторами, такими как заиление водохранилища.

Опыт зарубежных специалистов как нельзя лучше подходит для изучения и следования ему в рамках решения задач по принятию решений о продолжительности жизненных циклов ГТС, которые находятся в эксплуатации длительное время и у которых потенциально имеются высокие сроки службы, а также как обеспечивать разумное сохранение ресурса ГТС.

Цель установления расчетного срока службы – это, прежде всего, необходимость найти «границу» когда, в конечном счете, следует обеспечить принудительное заблаговременное прекращение применения объекта по назначению, исходя из требований безопасности или технико-экономических соображений.

5. УПРАВЛЕНИЕ СРОКАМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В состав ГЭС входит комплекс гидротехнических сооружений, включая здание ГЭС, другие сооружения, конструкции и элементы (далее – компоненты), основное и вспомогательное оборудование, предназначенные для обеспечения надёжного функционирования ГЭС по основному назначению – выработки электрической энергии.

В связи с отсутствием информации о правилах назначения сроков эксплуатации ГЭС и комплекса ГТС на ней, можно предположить, что при проектировании ГЭС с учетом существующей практики в отношении других технически сложных объектов, их зданий, сооружений и их частей был принят за основу амортизационный срок – срок эксплуатации, в течение которого должна быть покрыта сумма стоимости строительства ГЭС. Тогда срок эксплуатации ГТС ГЭС гарантированно должен был составить не менее 30 – 33 лет.

Опыт эксплуатации на отечественных гидроэлектростанциях ГТС первого и второго классов, у которых срок службы согласно [4] может быть 100 лет, показывает, что они надёжно эксплуатируются за пределами 50-летнего срока; а у большого числа ГТС третьего и четвертого классов, у которых срок службы согласно [4] может быть 50 лет, срок службы 50 лет превышен, но ГТС продолжают эксплуатироваться. Это означает, что фактический срок службы у плотин и других постоянных сооружений ГЭС может быть значительно выше относительно амортизационного срока. Тем не менее, актуально знать, насколько срок службы (срок эксплуатации) может превышать амортизационный срок эксплуатации ГЭС с гарантией безопасности его гидротехнических сооружений, и как можно управлять сроком эксплуатации ГТС в дальнейшем.

С учетом положений и требований, изложенных в [1 – 4], осуществляется проектирование технически сложного объекта – ГЭС и комплекса ГТС, выбор для ГЭС оборудования и иных компонентов с заданными показателями надёжности, согласно которым вероятность пребывания параметров ГТС ГЭС находилась в допустимых пределах при строительстве и эксплуатации.

Безопасная и надёжная эксплуатация ГТС ГЭС определяется такими показателями надёжности, как долговечность, безотказность, ремонтпригодность, сохранность. И эти показатели требуют подтверждения на этапе эксплуатации. При проектировании ГТС должны учитываться факторы воздействий природного, техногенного и антропогенного характера, которые характеризуются значениями вероятностей реализации на территории размещения объекта.

Основными методами подтверждения возможности продолжения эксплуатации ГТС в настоящее время являются выполняемые эксплуатирующей организацией ГЭС мероприятия по техническому обслуживанию, устранению дефектов, ликвидации неполадок, а также регулярные обследования, осмотры, декларирование безопасности не реже одного раза в пять

лет. В процессе эксплуатации эксплуатирующей организацией проводится деятельность по снижению влияния повреждающих факторов на ГЭС и её ГТС.

Может ли такая деятельность обеспечивать непрерывность безопасной эксплуатации ГТС ГЭС на длительную перспективу?

Соответствие требованиям проектной документации не является надёжной гарантией безопасности, так как за длительный период эксплуатации объекта фактически могли измениться условия эксплуатации (проектные основы) по разным причинам.

Несмотря на отсутствие данных у находящихся в эксплуатации ГТС ГЭС третьего и четвертого классов, «перешагнувших» срок службы в 50 лет, об остаточных ресурсах их систем и элементов, важных для безопасности, можно считать, что их фактический срок службы может быть больше нормативно установленного.

В настоящее время отсутствуют правовые основания как для того, чтобы прекратить эксплуатацию объекта, так и для того, чтобы разрешить его дальнейшую эксплуатацию в случае, когда ГТС ГЭС находятся в эксплуатации за пределами нормативно установленного расчетного срока службы.

Поэтому существует актуальность подтверждения гарантии безопасности для ГТС, находящихся уже длительное время в эксплуатации, и определения возможного дополнительного срока их безопасной эксплуатации.

Гидроэлектростанции, как уже неоднократно отмечалось выше, относятся к технически сложным объектам, у которых гидротехнические сооружения (все или их часть) являются основными (постоянными) системами. При этом среди этих ГТС имеются сооружения, которые легко подлежат обновлению (замене, ремонту, капитальному ремонту их частей) и не являются ограничивающими продолжительность эксплуатации ГЭС. Имеются на гидроузле гидротехнические сооружения, которые следует отнести к категории «условно незаменимых» и срок их эксплуатации является определяющим для обеспечения продолжительной эксплуатации ГЭС с изменением (без изменения) её режимов эксплуатации, без проведения реконструкции или с проведением реконструкции этих ГТС.

Предложение по управлению сроками эксплуатации комплекса ГТС ГЭС заключается в применении подхода поэтапного назначения дополнительных сроков эксплуатации.

Этот подход может быть применён с учетом опыта управления сроками эксплуатации на атомных станциях, как это описано выше в главах 2 и 3, [11, 15], а также в [18] на основе результатов выполняемых исследований технического состояния и остаточных ресурсов у критически важных элементов каждого ГТС ГЭС. С учетом установленных у них запасов ресурсов, гарантирующих их безопасную эксплуатацию в продолжении некоторого периода времени, может прогнозироваться их дополнительный срок эксплуатации. Поэтапность назначения дополнительных сроков эксплуатации описывается ниже и заключается в следующем.

На основе знаний об остаточных ресурсах каждого ГТС составляется список ГТС ГЭС с указанием для них возможных дополнительных сроков эксплуатации.

С использованием этой информации назначается возможный дополнительный срок эксплуатации комплекса ГТС, который соответствует возможному сроку эксплуатации того гидротехнического сооружения, относящегося к постоянному условно незаменимому ГТС, характеризующемуся возможным минимальным дополнительным сроком эксплуатации.

Устранение дефицитов безопасности у этого ГТС создаёт условия для назначения безопасного дополнительного срока эксплуатации уже на основании данных о минимальном сроке службы другого ГТС, входящего в комплекс ГТС ГЭС.

Такой поэтапный подход даёт возможность для надёжного установления дополнительных сроков эксплуатации и управления дополнительными сроками эксплуатации

комплекса ГТС ГЭС при обеспечении планового восстановления в приоритетном порядке наиболее уязвимых ГТС (их техническое состояние приближается к предельному состоянию).

Таким образом, дополнительные сроки эксплуатации комплекса ГТС ГЭС назначаются поэтапно, используя интегрированную базу знаний о минимальных возможных сроках службы всех ГТС комплекса.

Если дополнительный срок эксплуатации комплекса ГТС ГЭС очень мал (остаточный срок службы не более 2-х лет) и может быть продлён только путём реконструкции основных или почти всех ГТС, входящих в состав комплекса ГТС ГЭС, то в этом случае назначается консервация объекта.

В период консервации ГЭС должна обеспечиваться безопасность для населения и окружающей среды, в том числе гидрологическая безопасность на территориях выше и ниже размещения ГЭС.

Продолжительность этапа консервации ГЭС может зависеть от готовности проектной документации на реконструкцию, а также от решения задачи по обеспечению финансированием для начала работ по реконструкции.

В настоящее время в Российской Федерации опыт по консервации и ликвидации ГТС ГЭС незначительный, в целом можно утверждать, что он практически отсутствует, несмотря на наличие законодательных и иных нормативных правовых актов в этой области.

Ликвидация ГТС требует значительных затрат, в том числе на восстановление экологии при ликвидации водохранилища.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации проводятся работы по модернизации ГЭС заменой основного оборудования на новое. Однако информации о назначенных дополнительных сроках эксплуатации ГТС ГЭС после масштабной замены основного оборудования и иных проведенных работ по модернизации на ГЭС не имеется. Представляется, что новые установленные сроки эксплуатации оборудования и комплекса ГТС ГЭС должны быть едиными, что создаст основу для надёжного управления сроками эксплуатации объекта, эффективного вложения средств на ремонтные и восстановительные работы по обеспечению надёжного технического состояния ГТС на срок эксплуатации, который должен быть не ниже, чем у основного оборудования.

В эксплуатации находится значительное число ГЭС, у которых гидротехнические сооружения третьего и четвертого классов отработали длительное время и продолжают эксплуатироваться за пределами расчетных сроков службы, которые установлены в действующих нормативных правовых актах для целей проектирования ГТС разного назначения.

Для выявления наличия (отсутствия) требований по назначению срока службы ГТС (срока эксплуатации), по процедурам оценки возможности и порядка продления срока эксплуатации ГТС, находящихся на этапе эксплуатации, были рассмотрены федеральные законы, иные нормативные правовые акты. В их числе Градостроительный кодекс Российской Федерации, как основной федеральный закон о проектировании, строительстве, приёмке в эксплуатацию объектов капитального строительства, также содержащий требование об отнесении гидротехнических сооружений первого и второго классов к опасным и технически сложным объектам. Было установлено отсутствие положений о назначении и контроле сроков эксплуатации.

Другим важным федеральным законом для изучения наличия в нём положений и требований по назначению сроков службы (сроков эксплуатации) является Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». В статье 33 этого Федерального

закона изложены требования к предупреждению действий, вводящих в заблуждение приобретателей, в составе которых имеется ссылка на необходимость указания срока эксплуатации здания или сооружения и их частей. Из этого следует, что информация о сроке эксплуатации в принципе должна быть, но назначение срока эксплуатации объекта является компетенцией застройщика, технического заказчика, а реализация требований по обеспечению назначенного расчетного срока службы является компетенцией осуществляющей разработку проекта по заказу застройщика (технического заказчика) проектной организации. Также необходимо учитывать, что согласно статье 42 Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» требования этого закона не применяются «вплоть до реконструкции или капитального ремонта здания или сооружения».

В Своде правил СП 255.1325800.2017 «Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения», приводятся рекомендации по установлению расчетных сроков службы, которые должны быть определены генпроектировщиком по согласованию с заказчиком.

В Своде правил СП 58.13330.2019 «Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003» введены значения сроков службы ГТС для целей проектирования, а также определены отдельные задачи, которые следует решать при истечении сроков службы для вновь проектируемых ГТС.

В Федеральном законе «О безопасности гидротехнических сооружений» и Федеральном законе «Об электроэнергетике», которые в основном содержат положения, относящиеся к стадии жизненного цикла – «эксплуатация» отсутствуют обращения к терминам «срок службы», «срок эксплуатации». В Федеральном законе «Об электроэнергетике» имеются положения, относящиеся к «выводу из эксплуатации», но отсутствуют критерии необходимости вывода из эксплуатации. Можно ли в числе причин вывода из эксплуатации рассматривать превышение для объекта электроэнергетики, в том числе и для ГЭС проектного срока службы (срока эксплуатации).

В 2016 году для реализации п. 3.1.1. Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей [19] разработан СТО РусГидро-02.03.119-215. от 02.03.2016 г. № 137 Стандарт организации «Гидротехнические сооружения гидроэлектростанций. Методические рекомендации по выполнению многофакторных исследований».

Многофакторные исследования (в последние годы стали называться комплексными) должны выполняться для ГТС, у которых срок эксплуатации превысил 25 лет. Но в большинстве случаев получаемые результаты многофакторных исследований не интерпретируются к оценкам остаточных ресурсов ГТС и оборудования ГЭС, не применяются для прогнозирования допустимой продолжительности дальнейшей эксплуатации ГТС, оборудования и ГЭС в целом. Совершенно очевидной является необходимость совместного рассмотрения гидротехнических сооружений и оборудования гидроэлектростанции. В соответствии с пунктом 3.1.1. Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей [19] многофакторные исследования проводятся только для напорных ГТС. На этапе эксплуатации ГЭС выполняется комплекс ремонтно-восстановительных работ на ГТС и оборудовании. Все текущие и капитальные ремонты, многофакторные обследования и многофакторные исследования ГТС обеспечивают системное улучшение оперативной стабильности ГЭС и надежность поставки электрической энергии от ГЭС потребителям.

Для ряда ГЭС, у которых техническое состояние ГТС не препятствует их дальнейшей эксплуатации, эксплуатирующая организация (собственник) усматривают в их дальнейшей эксплуатации экономическую целесообразность.

Как уже отмечалось ранее, оборудование ГЭС не является препятствием для продления срока эксплуатации. Но при достижении ГТС установленного срока эксплуатации эксплуатирующей организацией (собственником) ГЭС должно приниматься решение о

целесообразности продления срока эксплуатации ГТС, о дополнительном сроке эксплуатации ГТС или о выводе его из эксплуатации, исходя из:

- возможности обеспечения безопасности ГТС и установленного на ГЭС основного оборудования при эксплуатации ГЭС, как в проектных режимах, так и во внештатных режимах, которые могут возникать в период дополнительного срока эксплуатации;

- экономической и социальной целесообразности продления срока эксплуатации ГЭС по назначению, в том числе с учетом возможности её модернизации, изменения показателей мощности и других параметров оборудования и ГТС.

Управление сроком эксплуатации ГТС ГЭС – сложный интеграционный процесс, включающий выполнение многофакторных (комплексных) исследований всех ГТС ГЭС, анализ и принятие важных решений.

Однако в настоящее время отсутствуют утверждённые и введённые в действие нормативные документы, в которых установлены основные положения для оценки возможности продления срока эксплуатации ГТС и срока эксплуатации ГЭС в целом.

С целью обеспечения планирования и осуществления в отношении комплекса ГТС ГЭС дальнейших действий (продление срока эксплуатации, модернизация, реконструкция, консервация, ликвидация), а также контрольно-надзорной деятельности федерального государственного надзора в области безопасности гидротехнических сооружений необходимо разработать соответствующие нормативные правовые документы для обеспечения деятельности по продлению сроков эксплуатации гидротехнических сооружений на гидроэлектростанциях.

Опыт продления сроков эксплуатации АЭС целесообразно учитывать при разработке нормативных основ управления сроком эксплуатации ГТС ГЭС.

Рекомендуется в число необходимых для разработки документов включить Свод правил и (или) Стандарт организации (СТО) с названием «Правила назначения срока эксплуатации комплекса гидротехнических сооружений на гидроэлектростанции», а также разработать документ Требования безопасности и надёжности объектов электроэнергетики «Управление сроками эксплуатации гидротехнических сооружений гидроэлектростанции на этапе эксплуатации». Для обеспечения применения этих требований безопасности и надёжности целесообразно разработать (актуализировать действующие) методические документы. В их число следует включить документы по исследованию технического состояния ГТС, по оценкам остаточных ресурсов элементов сооружений, по проведению вероятностных анализов безопасности гидротехнических сооружений, по оценке рисков аварий на ГТС при внешних воздействиях природного и техногенного происхождения, по оценке сейсмостойкости находящихся в эксплуатации гидротехнических сооружений.

Почему вдруг эта проблема стала актуальной? Ответ простой. Потому что до определённого времени не были на нормативном уровне установлены сроки службы для ГТС разных классов. В настоящее время этот пробел в нормативном поле устранён для вновь проектируемых ГТС. Но для находящихся в эксплуатации ГТС нормативные основы для обеспечения их эксплуатации за пределами расчетных сроков службы отсутствуют.

В целом необходимо заключить, что отсутствие нормативной базы создаёт риски аварий по причине недостаточного управления вопросами безопасности в отношении находящихся в длительной эксплуатации комплексов ГТС на гидроэлектростанциях, особенно с учетом изменяющихся в процессе эксплуатации гидротехнических сооружений гидроэлектростанций условий окружающей среды. При длительной эксплуатации ГТС идёт расходование ресурса их систем и элементов, их старение. А старение, в свою очередь, определяется многофакторными проблемами, часть из которых может быть решена.

Поэтому создание нормативной базы и её применение для целей управления сроками эксплуатации комплекса ГТС на ГЭС позволит обеспечивать контроль технического состояния и безопасности каждого ГТС, снизить вероятность рисков аварий на ГТС, регулировать приоритеты использования финансовых ресурсов для ремонтно-восстановительных работ на наиболее важных сооружениях.

Список литературы

1. Федеральный закон от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ «Градостроительный кодекс Российской Федерации». Москва.
2. Федеральный закон от 23 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент «О безопасности зданий и сооружений». Москва.
3. СП 255.1325800.2017. «Здания и сооружения. Правила эксплуатации. Основные положения». Росстандарт; 2019.
4. СП 58.13330.2019 «Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003». Росстандарт; 2019.
5. Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений». Москва.
6. Федеральный закон от 26 марта 2003 г. № 35-ФЗ «Об электроэнергетике». Москва.
7. СТО РусГидро 02.03.77-2015 «Гидроэлектростанции. Продление срока службы основного оборудования в процессе эксплуатации. Нормы и требования». ПАО Русгидро; 2017.
8. ГОСТ Р 53480 2009. Надёжность в технике. Термины и определения. Стандартиформ; 2010.
9. Школин А. Источник: <https://www.gd.ru/articles/9773-amortizatsiya-oborudovaniya>
10. ГОСТ Р 27.102-2021 Надёжность в технике. Надёжность объекта. Термины и определения (применяется с 01.01.2022 взамен ГОСТ 27.002-2015). Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии; 2021.
11. Калиберда И.В. О сроках безопасной эксплуатации действующих атомных энергоблоков. Безопасность, надёжность, риск // *Методы менеджмента качества*. 2000. № 9. С. 26–30; 2000. № 10. С. 36–40.
12. Калиберда И.В., Вишневский Ю.Г., Гуцалов А.Т. О продлении срока эксплуатации блока атомной электростанции // *Конверсия в машиностроении*. 2000. № 6. С. 64–66.
13. Kaliberda I.V., Pachner J. Development of Russian Regulatory Basis for License Renewal/Life extension of Nuclear Power Plants. ICONE 10, Paper N ICONE 10-22569. Washington, 2002.
14. Kaliberda I.V. The development and the experience of use the regulatory documents for life extension russian NPP units. Technical re-equipment and modernisation can solve the problem of moral ageing of NPP units. International Atomic Energy Agency. Technical meeting on enhancing npp safety, performance and life extension through effective ageing management. 711-J7-TM-25225. VIC, Vienna, Austria, 24 to 26 June, 2002.
15. НП-017-18. Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции (утверждены приказом Ростехнадзора от 5 апреля 2018 г. № 162). (Пересмотр НП-017-2000. Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции», утверждённые постановлением Госатомнадзора России 28 декабря 2000 г. № 16) .
16. Wieland M., Mueller R. Dam safety, emergency action plans and water alarm systems. *International water power & dam construction*. January 2009, pp. 34–39.
17. Wieland M. Life-span of storage dams. *International water power & dam construction*.

February 2010, pp. 32–35.

18. Kaliberda I.V. Multifactorial studies for management of operating life of hydroelectric power plants. Sustainable and Safe Dams Around the World – Tournier, Bennett & Bibeau (Eds). 2019 Canadian Dam Association, ISBN 978-0-367-33422-2

19. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации, утверждёнными приказом Минэнерго России от 19 июня 2003 г. № 229.

Reference

1. Federal Law № 190-FZ of December 29, 2004 «Urban Planning Code of the Russian Federation». Moscow. [In Russian]

2. Federal Law № 384-FZ of December 23, 2009 «Technical Regulations «On the Safety of Buildings and Structures». Moscow. [In Russian]

3. SP 255.1325800.2017. «Buildings and structures. Operating rules. Basic provisions». Rosstandart; 2017. [In Russian]

4. SP 58.13330.2019 «Hydraulic structures. The main provisions. Updated edition of SNiP 33-01-2003». Rosstandart; 2019. [In Russian].

5. Federal Law № 117-FZ of July 21, 1997 «On the Safety of Hydraulic structures». Moscow. [In Russian]

6. Federal Law №. 35-FZ of March 26, 2003 «On Electric Power Industry». Moscow. [In Russian].

7. SRT RusHydro 02.03.77-2015 «Hydroelectric power plants. Extending the service life of the main equipment during operation. Norms and requirements». PAO Rusgidro; 2017. [In Russian]

8. GOST R 53480 2009. «Reliability in technology. Terms and definitions». Standartinform; 2010. [In Russian]

9. Shkolin A. A source: <https://www.gd.ru/articles/9773-amortizatsiya-oborudovaniya>

10. GOST R 27.102-2021 «Reliability in technology. Reliability of the object. Terms and definitions (applied from 01.01.2022 instead of GOST 27.002-2015)». Federal Agency for Technical Regulation and Metrology; 2021. [In Russian]

11. Kaliberda I.V. On the terms of safe operation of existing nuclear power plants power units. Safety, reliability, risk. *Methods of Quality Management*. 2000, no. 9, pp. 26–30; 2000, no.10, pp. 36–40. [In Russian].

12. Kaliberda I.V., Vishnevsky Yu.G., Gutsalov A.T. On extending the life of a nuclear power plant unit. *Conversion in Mechanical Engineering*. 2000, no. 6, pp. 64–66. [In Russian]

13. Kaliberda I.V., Pachner J. Development of Russian Regulatory Basis for License Renewal/Life extension of Nuclear Power Plants. ICONE 10, Paper N ICONE 10-22569. Washington, 2002.

14. Kaliberda I.V. The development and the experience of use the regulatory documents for life extension russian NPP units. Technical re-equipment and modernisation can solve the problem of moral ageing of NPP units. International Atomic Energy Agency. Technical meeting on exchanging npp safety, performance and life extension through effective ageing management. 711-J7-TM-25225. VIC, Vienna, Austria, 24 to 26 June, 2002.

15. NP-017-18. «The main requirements for extending the life of the nuclear power plant unit» (approved by Rostekhnadzor Order №. 162 dated April 5, 2018). (Revision of NP-017-2000. «Basic requirements for extending the life of the Nuclear power plant unit», approved by Resolution №. 16 of the Gosatomnadzor of Russia on December 28, 2000). [In Russian]

16. Wieland M., Mueller R. Dam safety, emergency action plans and water alarm systems.

International water power & dam construction. January 2009, pp. 34–39.

17. Wieland M. Life-span of storage dams. *International water power & dam construction*. February 2010, pp. 32–35.

18. Kaliberda I.V. Multifactorial studies for management of operating life of hydroelectric power plants. Sustainable and Safe Dams Around the World – Tournier, Bennett & Bibeau (Eds). 2019 Canadian Dam Association, ISBN 978-0-367-33422-2

19. Rules of technical operation of Electric power stations and networks of the Russian Federation approved by the Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 229 dated June 19, 2003. [In Russian].

Информация об авторах /Information about authors

Калиберда Инна Васильевна, доктор технических наук, научный руководитель ФБУ «Научно-технический центр Энергобезопасность». Москва, Российская Федерация.

e-mail: Kaliberdajob@mail.ru

Kaliberda Inna V., Dr. Sci. (Engineering), Scientific Leader. Federal Budgetary Enterprise “Scientific and Engineering Centre for Energy Safety”. Moscow, Russian Federation

Пименов Владимир Иванович, кандидат технических наук, начальник отдела Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Москва, Российская Федерация.

e-mail: V.Pimenov@gosnadzor.gov.ru

Pimenov Vladimir I., Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department. Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. Moscow, Russian Federation.