



УДК 692.44

DOI 10.25628/UNIIP.2024.61.2.012

МАРКЕЛОВ М. Ю., АЛЁХИН В. Н., УШАКОВ О. Ю., ЗУБРИЦКИЙ М. А.

# Особенности проектирования арочных покрытий объектов использования атомной энергии в процессе возведения

**Маркелов  
Максим  
Юрьевич**

аспирант, директор  
ООО «Инженерный центр»,  
Екатеринбург, Российская  
Федерация

e-mail:  
m.markelov@en-ce.ru



**Алехин  
Владимир  
Николаевич**

кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой  
САПРОС, Институт  
строительства  
и архитектуры, Уральский  
федеральный университет  
(УрФУ), Екатеринбург,  
Российская Федерация

e-mail:  
referetsf@yandex.ru



**Ушаков  
Олег  
Юрьевич**

кандидат технических  
наук, доцент, Институт  
строительства  
и архитектуры,  
Уральский федеральный  
университет (УрФУ),  
Екатеринбург, Российская  
Федерация

e-mail:  
ushakovoleg@yandex.ru



**Зубрицкий  
Максим  
Александрович**

кандидат технических наук,  
Уральский государствен-  
ный архитектурно-худо-  
жественный университет  
им. Н. С. Алферова  
(УрГАХУ), Проектный центр,  
главный инженер проектов,  
Екатеринбург, Российская  
Федерация

e-mail:  
zubrickiy\_maksim@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы применения различных типов опалубки при возведении арочных покрытий объектов использования атомной энергии. Представлены преимущества использования несъемной опалубки. Описаны методы расчета металлоконструкций опалубки, учета нагрузок, включая особые воздействия по нормам строительного проектирования атомных станций с реакторами различного типа.

**Ключевые слова:** здания и сооружения, особые воздействия, свод, несъемная опалубка.

*Markelov M. Yu., Alekhin V. N., Ushakov O. Yu., Zubritskiy M. A.*

*Arched roof structures designing features for nuclear energy facilities during construction*

*The article discusses the use of various types of formworks during arched roof structures construction for nuclear energy facilities. The advantages of using nonremovable formwork is presented. Calculating methods for formwork metal structures taking into account loads, including special impacts according to the standards of construction design of nuclear power plants with reactors of various types is described.*

*Keywords: buildings and structures, special loads, vault, permanent formwork.*

## Введение

В качестве покрытия центрального зала объектов использования атомной энергии (далее — ОИАЭ), в зависимости от формы главного здания, используют несколько видов конструкций. Одним из видов является арочное покрытие из монолитного железобетона. Особенностью строительства ОИАЭ является параллельное производство строительных и монтажных работ, работ по сооружению пола центрального зала и покрытия центрального зала. Указанные особенности накладывают определенные ограничения на возможность применения того или иного типа опалубки.

Целью данной статьи является анализ различных конструктивных решений опалубки при возведении арочного покрытия ОИАЭ. Рассмотрены преимущества и недостатки каждого вида опалубки, даны рекомендации по их использованию. Поскольку ОИАЭ с подобной конструкцией арочного покрытия сооружаются сравнительно недавно (в основном это сферические своды) и отсутствует обширный опыт применения несъемной опалубки, в статье представлено описание конструктивных решений, расчетного анализа и перспективы применения несъемной опалубки.

Первый тип опалубки — инвентарная опалубка свода на силовых лесах (Иллюстрация 1). Установка лесов производится на плиту перекрытия на отметке пола центрального зала. Установка опалубки на следующем участке бетонирования производится после демонтажа лесов на предыдущем участке.

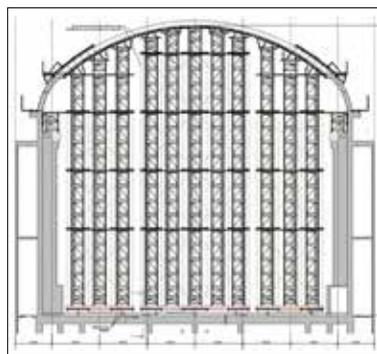


Иллюстрация 1. Инвентарная опалубка свода на силовых лесах (чертеж).  
Автор М. Ю. Маркелов

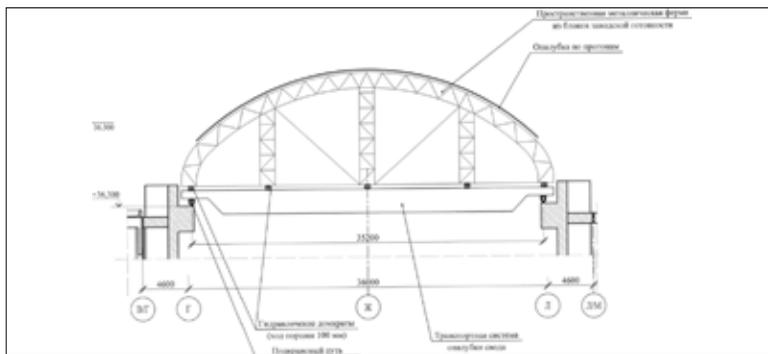


Иллюстрация 2. Передвижная опалубка тоннельного типа (чертеж).  
Автор М. Ю. Маркелов



Иллюстрация 3. Несъемная опалубка (пространственная модель конструкции, программный комплекс ANSYS).  
Автор М. Ю. Маркелов

Таблица 1. Сравнение вариантов возведения свода

Вариант	Длительность, месяцев	
	Сооружение свода	Срок до старта монтажных работ в центральном зале
Тип № 1. Инвентарная опалубка свода на силовых лесах	16	16
Тип № 2. Передвижная опалубка тоннельного типа	14	14
Тип № 3. Несъемная опалубка	8,5	6

Второй тип опалубки – передвижная опалубка тоннельного типа (Иллюстрация 2). Палуба размещается на транспортной системе, которая перемещается по подкрановым путям мостового крана центрального зала. До перемещения на следующий участок бетонирования производится технологический опуск палубы с помощью системы домкратов.

Третий тип опалубки – несъемная металлическая опалубка по пространственным металлическим балкам (Иллюстрация 3). Блоки несъемной опалубки свода изготавливаются в заводских условиях и транспортируются марками поставляются на строительную площадку, собираются на площадке укрупнительной сборки в зоне монтажа. После завершения строительно-монтажных работ демонтаж опалубки не производится, она остается в проектом положении на весь период эксплуатации объекта.

Основным отличием несъемной опалубки от других типов является возможность непрерывного выполнения монолитных работ, отсутствие технологических пауз, связанных с перемещением опалубки с одной захватки на другую. Кроме того, данный способ работ позволяет исключить взаимное влияние с работами по сооружению пола центрального зала, исключить проектирование и изготовление нестандартного оборудования передвижной опалубки

тоннельного типа, а также опережающим темпом произвести закрытие теплового контура здания и приступить к монтажу оборудования.

Известно, что одной из основных проблем строительства ОИАЭ являются сроки сооружения, которые, в свою очередь, влияют на общую стоимость строительства. Использование несъемной опалубки при сооружении сводов, при прочих равных условиях, позволяет выполнить бетонирование конструкции на 130 дней раньше в сравнении с альтернативными рассматриваемыми вариантами (Таблица 1).

Применение несъемной опалубки позволяет оптимизировать график выполнения работ при сооружении ОИАЭ, использовать комплексный подход к выполнению строительно-монтажных работ, управляя технологическими процессами параллельно со строительными работами, выполнять полный спектр монтажных работ на оборудовании первого контура реакторной установки.

#### Описание конструктивных особенностей

Конструкция металлической несъемной опалубки свода представляет из себя пространственные жесткие блоки, скомпонованные из следующих элементов:

- трех несущих арок, выполненных из сварных двутавров криволинейного очертания, вписанных

по внутренней грани арки, установленных с шагом 2 м в осях;

- плоских радиально установленных связевых блоков в виде ферм из стальных замкнутых квадратных профилей;
- элементов горизонтальных связей по верхним поясам арок из стальных замкнутых квадратных профилей;
- профилированный лист Н114 опирается на верхние пояса арок;
- в местах монтажных стыков сварных двутавров в качестве опалубки выполнены металлические щиты, состоящие из квадратных профилей и уложенных на них листов толщиной 8 мм.

Конструкция покрытия центрального зала объекта использования атомной энергии относится к I категории<sup>1</sup>, разрушение или повреждение которых может привести путем силового воздействия на важные для безопасности системы нормальной эксплуатации к выходу радиоактивных продуктов в количествах, приводящих к дозовым нагрузкам для персонала и для населения сверх установленных значений при максимальной проектной аварии, или к отказу в работе систем безопасности, обеспечивающих поддержание активной зоны в подкритическом состоя-

1 ПиН АЭ-5.6. Нормы Строительного Проектирования АС с реакторами различного типа. Правила и нормы в атомной энергетике. Министерство атомной энергетики СССР.

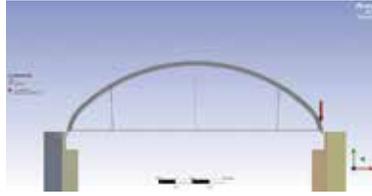


Иллюстрация 4. Нагрузка от свежееуложенной бетонной смеси (пространственная модель конструкций, программный комплекс ANSYS). Автор М. Ю. Маркелов

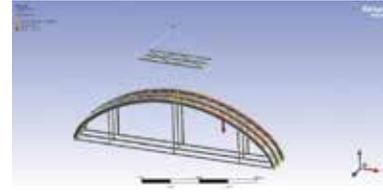


Иллюстрация 5. Нагрузка в монтажном положении (пространственная модель конструкций, программный комплекс ANSYS). Автор М. Ю. Маркелов

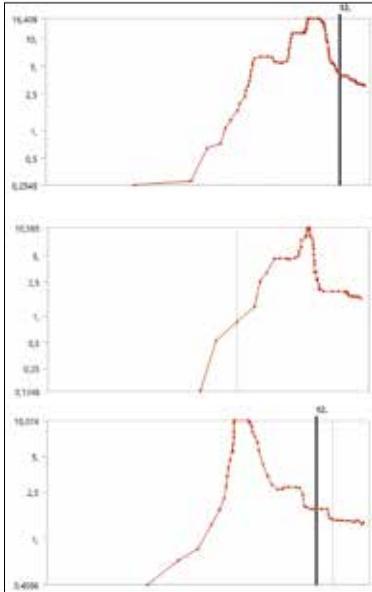


Иллюстрация 6. Поэтажные спектры ответа при землетрясении (график, программный комплекс ANSYS). Автор О. Ю. Ушаков

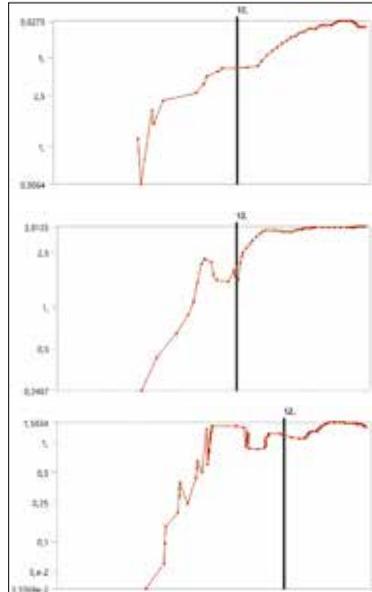


Иллюстрация 7. Поэтажные спектры ответа при взрывной ударной волне (график, программный комплекс ANSYS). Автор О. Ю. Ушаков

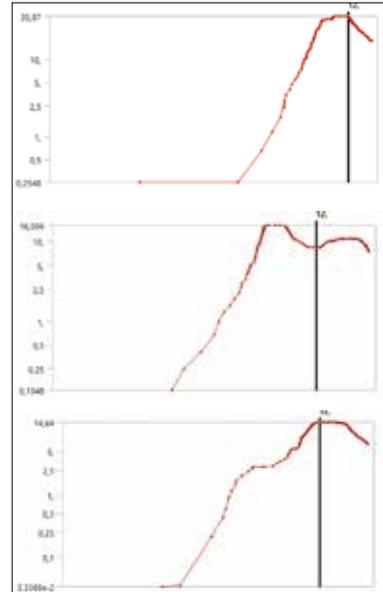


Иллюстрация 8. Поэтажные спектры ответа при падении самолета (график, программный комплекс ANSYS). Автор О. Ю. Ушаков

нии, аварийный отвод тепла от реактора, локализацию радиоактивных продуктов. Данный фактор подразумевает необходимость выполнения расчета конструкций покрытия центрального зала на комплекс внешних воздействий природного и техногенного характера<sup>2</sup>.

### Расчетное обоснование пространственной модели конструкций свода

Расчеты пространственной модели конструкций свода выполнены в программном комплексе ANSYS:

- 1 На полную расчетную нагрузку с учетом поэтапного нагружения конструкций, имитирующего реальный процесс бетонирования свода (расчетная нагрузка  $2,45 \text{ т/м}^2$ ). Нагрузка от свежееуложенной бетонной смеси представлена на Иллюстрации 4.
- 2 На монтажную нагрузку при подъеме блока перед установкой в проектное положение (Иллюстрация 5).
- 3 На комплекс внешних воздействий природного и техногенного характера в соответствии с НП 064-17. Внешние воздействия природного характера — это:
  - сейсмическое воздействие — соответствующее уровню максимального расчетного землетрясения (МРЗ) интенсивностью 7 баллов и проектного землетрясения (ПЗ) интенсивностью 6 баллов по шкале MSK-64.

<sup>2</sup> НП-064-17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.

Сейсмическое воздействие задано в виде поэтажных спектров ответа (Иллюстрация 6);

- экстремальная ветровая нагрузка — ветер со скоростью 28 м/с (один раз в 10 тыс. лет);
  - смерч — с длиной пути прохождения 11,58 км, шириной пути прохождения 120 м, максимальной горизонтальной скоростью вращательного движения стенки 65 м/с, поступательной скоростью движения стенки 16 м/с, перепадом давления между периферией и центром воронки 5,2 кПа.
- Внешние воздействия техногенного характера:
- воздействие воздушной ударной волны — с избыточным давлением во фронте 10 кПа и продолжительностью фазы сжатия до 1 с. Нагрузка от взрывной ударной волны задана в виде поэтажных спектров ответа (Иллюстрация 7);
  - падение самолета — массой 5,7 т со скоростью 100 м/с. Нагрузка от падения самолета задана в виде поэтажных спектров ответа (Иллюстрация 8).

Расчет выполнялся методом конечных элементов в объемной постановке в программном комплексе Ansys Mechanical, имеющем действующий аттестационный паспорт программного средства НТЦ ЯРБ.

Для выполнения расчетов на статические и сейсмические воздействия использовался программный комплекс ANSYS. Теоретической основой ANSYS является метод конечных элементов, реализованный в форме метода перемещений.

	A	B	C	D	E	F	G
1		Environment	Static Structural	Response Spectrum	Response Spectrum 2	Response Spectrum 3	Response Spectrum 4
2		Time/Frequency	End Time	Response Spectrum			
3		Phase Angle					
4							
5	Combination Name	Type					
6	Combination 1	Linear	0,9	1	0	0	0
7	Combination 2	Linear	0,9	0	1	0	0
8	Combination 3	Linear	0,9	0	0	1	0
9	Combination 4	Linear	0,9	0	0	0	1

Иллюстрация 9. Коэффициенты сочетаний (таблица нагрузок, программный комплекс ANSYS). Автор М. Ю. Маркелов

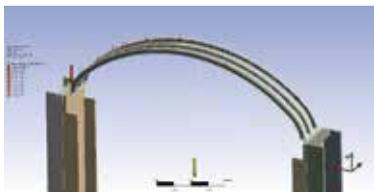


Иллюстрация 10. Расчетная схема несъемной опалубки (пространственная модель конструкций, программный комплекс ANSYS). Автор М. Ю. Маркелов

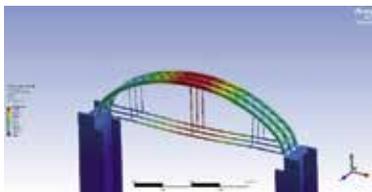


Иллюстрация 11. Деформированный вид конструкции (пространственная модель конструкций, программный комплекс ANSYS). Автор М. Ю. Маркелов

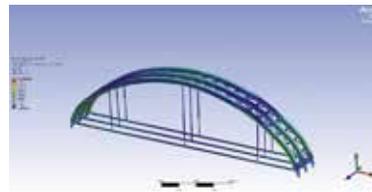


Иллюстрация 12. Напряжения от основного сочетания (пространственная модель конструкций, программный комплекс ANSYS). Автор М. Ю. Маркелов

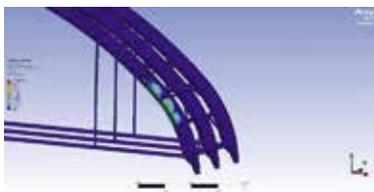


Иллюстрация 13. Анализ общей устойчивости (пространственная модель конструкций, программный комплекс ANSYS). Автор М. Ю. Маркелов

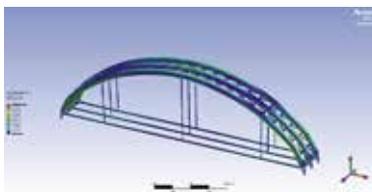


Иллюстрация 14. Напряжения от взрывной ударной волны (пространственная модель конструкций, программный комплекс ANSYS). Автор М. Ю. Маркелов

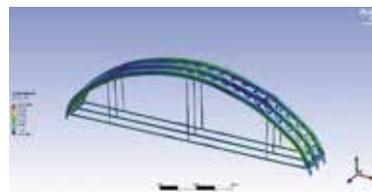


Иллюстрация 15. Напряжения от удара самолета (пространственная модель конструкций, программный комплекс ANSYS). Автор М. Ю. Маркелов

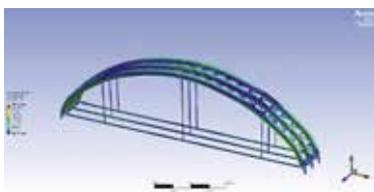


Иллюстрация 16. Напряжения при проектном землетрясении (пространственная модель конструкций, программный комплекс ANSYS). Автор М. Ю. Маркелов

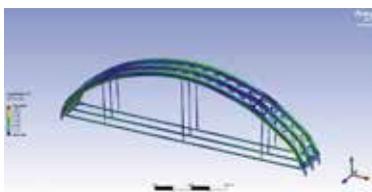


Иллюстрация 17. Напряжения при максимальном расчетном землетрясении (пространственная модель конструкций, программный комплекс ANSYS). Автор М. Ю. Маркелов

Деформированный вид конструкции после окончания бетонирования представлен на Иллюстрации 11.

Результаты расчетов на основное и особое сочетание нагрузок представлены на Иллюстрациях 12–17.

## Заключение

Применение несъемной опалубки позволяет оптимизировать график выполнения работ при сооружении ОИАЭ, использовать комплексный подход к выполнению строительномонтажных работ, управляя технологическими процессами параллельно со строительными работами, выполнять полный спектр монтажных работ на оборудовании первого контура реакторной установки.

Применение несъемной опалубки позволяет непрерывно выполнять монолитные работы, поскольку отсутствуют технологические паузы, связанные с перемещением опалубки с одной захватки на другую. Кроме того, данный способ работ позволяет исключить взаимное влияние с работами по сооружению пола центрального зала, исключить проектирование и изготовление нестандартного оборудования передвижной опалубки тоннельного типа, а также опережающим темпом произвести закрытие теплового контура здания и приступить к монтажу оборудования.

Высокопроизводительный вычислительный модуль позволяет решать задачи статики динамики с большим числом неизвестных (до 400 000) и высокой точностью. Имеется развитая библиотека конечных элементов, включающая стержневые конечные элементы, пластинчатые и оболочечные конечные элементы, а также объемные конечные элементы, специальные конечные элементы для моделирования грунтового основания и различных упругих связей и т. д. Вычислительный модуль выполняет расчет на отдельные статические и динамические загрузки, на комбинации загрузок, на расчетные сочетания усилий, определяет реакции и нагрузки на фрагмент схемы здания и т. д.

При проектировании учитываются постоянные и временные (длительные, кратковременные и особые) на-

грузки, нагрузки от веса строительных конструкций, нагрузки от внешних природных и техногенных воздействий.

Нагрузки и воздействия на сооружение принимаются в соответствии с требованиями нормативных документов<sup>3, 4</sup>.

В соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» в зависимости от продолжительности действия нагрузок предусматривается учет постоянных и временных (длительных, кратковременных, особых) нагрузок. Коэффициенты сочетаний представлены на Иллюстрации 9.

3 СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85.

4 ГОСТ 34329-2017. Опалубка. Общие технические условия.

Использование несъемной опалубки при сооружении сводов при прочих равных условиях позволяет выполнить бетонирование конструкции на 130 дней раньше в сравнении с рассмотренными альтернативными вариантами, что, в свою очередь, ведет к уменьшению общей стоимости строительства объектов использования атомной энергии.

Расчетный анализ показал полное соответствие конструкции несъемной опалубки требованиям ПИН АЭ-5.6<sup>5</sup>, НП 064-17<sup>6</sup>, НП-031-01<sup>7</sup> и Федерального закона № 384-ФЗ<sup>8</sup> на период изготовления, монтажа и эксплуатации.

### Список использованной литературы

- [1] Бирбраер А. Н., Шульман С. Г. Оценка сейсмостойкости сооружений и оборудования АЭС в рамках нормативной методики // Энергетическое строительство. — 1987. — № 1. — С. 19–22.
- [2] Бирбраер А. Н., Шульман С. Г. Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 304 с.
- [3] Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. — СПб.: Наука, 1988. — 254 с.
- [4] Бирбраер А. Н., Шульман С. Г. Расчет сейсмостойкости резервуаров с жидкостью, применяемых на АЭС // Изв. ВНИИГ им. Воденеева. — 1977. — Т. 118. — С. 91–101.
- [5] Бугаенко С. Е. и др. Прочность и надежность конструкций АЭС при экстремальных воздействиях. — М.: Энергоатомиздат, 2005.
- [6] Буторин С. Л., Шульман Г. С., Шульман С. Г. Методы анализа безопасности АЭС при авиакатастрофах. — М.: Энергоатомиздат, 2006.
- [7] Расторгучев Б. С., Плотноков А. И., Хуснутдинов Д. З. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях. — М.: Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2007.
- [8] Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки / Н. Н. Белов [и др.]; Scientific&Technical Translations (SST). — Томск: Нортхэмптон, 2004.
- [9] Шамин В. М. Расчет защитных сооружений на действии взрывных нагрузок. — М.: Стройиздат, 1989.
- [10] Шульман Г. С. Об ударе летящего тела в сферическую преграду // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Воденеева. — 1993. — Т. 227. — С. 81–84.

### References

- [1] Birbraer A. N., Shul'man S. G. Ocenka sejsmostojkosti sooruzhenij i oborudovaniya AES v ramkah normativnoj metodiki // Energeticheskoe stroitel'stvo. — 1987. — № 1. — S. 19–22.
- [2] Birbraer A. N., Shul'man S. G. Prochnost' i nadezhnost' konstrukcij AES pri osobyh dinamicheskikh vozdeystviyah. — M.: Energoatomizdat, 1989. — 304 s.
- [3] Birbraer A. N. Raschet konstrukcij na sejsmostojkost'. — SPb.: Nauka, 1988. — 254 s.

5 ПИН АЭ-5.6. Нормы Строительного Проектирования АС с реакторами различного типа. Правила и нормы в атомной энергетике. Министерство атомной энергетики СССР. С. 5.

6 НП-064-17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. С. 5.

7 НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. Госатомнадзор России.

8 Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

- [4] Birbraer A. N., Shul'man S. G. Raschet sejsmostojkosti rezervuarov s zhidkost'yu, primenyaemyh na AES // Izv. VNIIG im. Vodenееva. — 1977. — T. 118. — S. 91–101.
- [5] Bugaenko S. E. i dr. Prochnost' i nadezhnost' konstrukcij AES pri ekstremal'nyh vozdeystviyah. — M.: Energoatomizdat, 2005.
- [6] Butorin S. L., Shul'man G. S., Shul'man S. G. Metody analiza bezopasnosti AES pri aviakatastrofah. — M.: Energoatomizdat, 2006.
- [7] Rastorguev B. S., Plotnikov A. I., Husnutdinov D. Z. Proektirovanie zdaniy i sooruzhenij pri avariynnyh vzryvnyh vozdeystviyah. — M.: Izd-vo Associacii stroit. vuzov, 2007.
- [8] Raschet zhelezobetonnyh konstrukcij na vzryvnye i udarnye nagruzki / N. N. Belov [i dr.]; Scientific&Technical Translations (SST). — Tomsk: Northampton, 2004.
- [9] Shamin V. M. Raschet zashchitnyh sooruzhenij na deystvie vzryvnyh nagruzok. — M.: Strojizdat, 1989.
- [10] Shul'man G. S. Ob udare letyashchego tela v sfericheskuyu pregradu // Izv. VNIIG im. B. E. Vodenееva. — 1993. — T. 227. — S. 81–84.

Статья поступила в редакцию 08.04.2024.

Опубликована 30.06.2024.

### Markelov Maksim Yu.

Graduate Student, Director, LLC «Engineering Center», Yekaterinburg, Russian Federation  
e-mail: m.markelov@en-ce.ru

### Alekhin Vladimir N.

Candidate of Technical Sciences, Head of a Department, Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russian Federation  
e-mail: referetsf@yandex.ru

### Ushakov Oleg Yu.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University (UrFU), Yekaterinburg, Russian Federation  
e-mail: ushakovoleg@yandex.ru  
ORCID ID: 0000-0002-7514-3108

### Zubritsky Maxim A.

Candidate of Technical Sciences, Ural State University of Architecture and Art (USUAA), Project Center, Chief Project Engineer, Yekaterinburg, Russian Federation  
e-mail: zubrickiy\_maksim@mail.ru  
ORCID ID: 0000-0003-2066-8086