

УДК 621.039.53

DOI 10.46960/1816-210X\_2025\_2\_59

EDN HIZZNZ

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ЦЕЛОСТНОСТИ КОНТЕЙНЕРОВ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Д.А. Лапшин

ORCID: 0009-0001-2801-1102 e-mail: lapshin\_da@okbm.nnov.ru

АО «ОКБМ Африкантов»

Нижний Новгород, Россия

Представлен анализ напряженно-деформированного состояния контейнера для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива при динамических воздействиях высокой интенсивности по разработанной методологии, для реализации которой были решены задачи, связанные с созданием обоснованных полномасштабных расчетных конечно-элементных моделей с обработкой всех геометрических особенностей проектируемого оборудования. Далее были исследованы динамические характеристики конструкционных материалов контейнера, на их основе верифицированы математические модели поведения этих материалов с учетом различных температур и скоростей деформирования. Разработаны сценарии граничных условий с реализацией в них комплексных механических воздействий техногенного характера, отвечающих всем требованиям нормативных документов. Особенность таких граничных условий заключается в том, что деформированная конструкция в результате одного из реализованных гипотетических событий передается как исходная в последующее событие для анализа целого ряда воздействий, которые могут происходить в течение всего эксплуатационного периода данного изделия.

**Ключевые слова:** транспортировка ядерного топлива, цифровые двойники, динамические воздействия высокой интенсивности, комплексный подход, верификация, сбалансированный топливный цикл.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Лапшин, Д.А. Разработка методологии для обоснования прочности и целостности контейнеров хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 2. С. 59-76. DOI: 10.46960/1816-210X\_2025\_2\_59 EDN: HIZZNZ

## DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY TO JUSTIFY STRENGTH AND INTEGRITY OF CONTAINERS FOR SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE AND TRANSPORTATION

D.A. Lapshin

ORCID: 0009-0001-2801-1102 e-mail: lapshin\_da@okbm.nnov.ru

Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** The article presents the stress-strain state analysis of a container for a spent nuclear fuel storage and transportation under high-intensity dynamic impacts using the developed methodology. Justified full-scale finite element models considering all geometric features of the designed equipment are developed for the implementation of this methodology. The dynamic characteristics of the structural materials used in the container design are investigated and the mathematical models of these materials behavior were verified based on these results taking into account different temperatures and strain rates. Scenarios of boundary conditions are developed with introducing complex man-caused mechanical impacts that meet all the regulatory documents' requirements. The distinguished feature of such boundary conditions is that the deformed structure caused by one of the realized hypothetical events is transferred to the subsequent event as an initial one to further analyze a number of impacts that may occur during the entire operational period of this product.

**Key words:** nuclear fuel transportation, digital twins, high intensity dynamic impacts, integrated approach, verification, balanced fuel cycle.

**FOR CITATION:** D.A. Lapshin. Development of a methodology to justify strength and integrity of containers for spent nuclear fuel storage and transportation. Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 59-76. DOI: 10.46960/1816-210X\_2025\_2\_59 EDN: HIZZNZ

## Введение

Важное место на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) занимают системы хранения и транспортирования отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО), которые реализуют завершённый сбалансированный топливный цикл. В силу серьёзных радиационных последствий из-за аварийных ситуаций, связанных с падением оборудования при проведении транспортно-технологических операций (ТТО), данные события должны быть рассмотрены как проектные и учтены при разработке конструкций, отвечающих за бесперебойный функционал данных объектов.

В настоящее время в России, в силу особенностей логистики той или иной атомной электростанции (АЭС), можно говорить либо о недостаточности, либо о полном отсутствии сертифицированных контейнеров отечественной разработки, которые входили бы в состав транспортных упаковочных комплектов (ТУК), обеспечивали ядерную и радиационную безопасность, были бы предназначены для транспортировки и хранения ОЯТ и позволяли бы безопасно завершить топливный цикл. Вследствие этого начинает возникать профицит ОЯТ, которое в недалеком будущем необходимо вывозить в места его захоронения. Крайне актуальной становится задача по разработке и созданию таких контейнеров.

В конечном виде ТУК к моменту его эксплуатации является дорогостоящим изделием со сложным конструктивным исполнением. Он должен соответствовать повышенным требованиям по следующим параметрам: динамической прочности при воздействии ударных нагрузок высокой интенсивности; геометрической совместимости со всеми объектами, встречающимися на транспортно-технологическом тракте за весь жизненный цикл; демпфирующим способностям, эффективно снижающим внешние динамические перегрузки природного и техногенного характера.

В процессе транспортировки и проведения ТТО должна исключаться как возможность выпадения ядерного топлива из контейнера, так и любое относительное смещение в нём ОЯТ [1-3]. Выполнение подобных требований подразумевает соответствие конструкции ТУК условиям динамической прочности, сохранения целостности (герметичности) и отсутствия недопустимого формоизменения. Упомянутые выше требования к ТУК предусматривают подтверждение его показателей безопасности путем проведения испытаний на ударные воздействия по регламентируемым нормативным требованиям, в частности, при падении ТУК на жесткую плиту с установленной высоты в различных положениях, на металлический штырь и т. п. [1-4]. Натурные испытания изделия и его отдельных элементов в процессе проектирования затруднены, прежде всего, в силу их значительной стоимости и целесообразны на завершающей стадии, при получении сертификата на изделие. В связи с этим, актуально численное исследование в процессе разработки конструкции ТУК с целью выявления и устранения конструктивных элементов, не удовлетворяющих условиям прочности при эксплуатационных нагрузках. Применение имеющихся методологий бывает недостаточным для воссоздания всех исходных событий, связанных с механическими воздействиями на проектируемую конструкцию при обосновании ее прочности [5].

Данные проблемы могут быть решены путем применения новых подходов к математическим исследованиям на базе создания подробных цифровых двойников конструкции, позволяющих в полной мере учесть как ее конструктивные особенности, так и все возможные виды воздействий, через алгоритмы, заложенные в граничных условиях расчетных моделей. Определяющими нагрузками для ТУК, являются ударные воздействия высокой интенсивности вследствие его падений с различных высот и в различных положениях. Акту-

альной становится разработка и внедрение методологии, позволяющей на стадии проектирования проводить более полный анализ возможных формоизменений конструкции с учетом фактических свойств материалов, используемых в конструкции, по результатам всего заложенного в цифровую модель комплекса механических воздействий. Такие подходы дадут возможность не только сформировать конечный облик изделия, но и подготовить в максимальной степени достоверные исходные данные для дальнейшего обоснования ядерной и радиационной безопасности конструкции реального контейнера. Процедура транспортировки и хранения каждой отработавшей тепловыделяющей сборки (ОТВС) является дорогостоящей, а создание более вместительных сертифицированных упаковок для ОТВС могло бы снизить себестоимость утилизации.

В настоящее время в АО «ОКБМ Африкантов» ведется разработка конструкции универсального контейнера хранения повышенной вместимости (УКХ ПВ, относящегося к новому поколению ТУК), отвечающего всем требованиям нормативной документации [1-4], предназначенного как для транспортировки ОТВС и РАО с АЭС типа ВВЭР 1200, так и для их длительного хранения.

В основу проектирования УКХ ПВ лег полномасштабный математический анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции при нормальных и аварийных условиях транспортировки с учетом всего спектра воздействий в едином сценарии.

При разработке методологии были решены следующие задачи.

1. Разработаны обоснованные полномасштабные цифровые геометрические модели с использованием верифицированных и аттестованных программных средств.

2. Экспериментально исследованы статические и динамические характеристики конструкционных материалов, используемых при проектировании УКХ ПВ.

3. Идентифицированы и адаптированы математические модели поведения исследованных конструкционных материалов на основе верификации результатов расчетов и экспериментальных данных для адекватного описания механики деформируемых твердых тел.

4. Разработаны сценарии граничных условий с реализацией в них комплексных механических воздействий природного и техногенного характера, отвечающих всем требованиям нормативных документов.

5. Проведено многоитерационное численное исследование прочности и целостности УКХ ПВ и ОТВС на многопроцессорных ЭВМ с использованием современных программных комплексов (ПК);

6. По результатам численных исследований определены элементы конструкции, не удовлетворяющие либо прочностным, либо демпфирующим способностям разрабатываемого изделия, и разработаны мероприятия по их доработке.

7. Разработаны исходные данные для обоснования разрабатываемого изделия по ядерной и радиационной безопасности на основе проведенного численного анализа УКХ ПВ и его внутреннего содержимого.

### **Методология исследования**

Разработанная методология заключается в создании цифровых двойников проектируемого оборудования, которые не только повторяют все геометрические особенности, но и имитируют все предполагаемые исходные события, которые могут произойти с данным оборудованием в процессе эксплуатации, с изменяющимися характеристиками конструкционных материалов в процессе реализации поставленной задачи. За счет создания подробных математических двойников, способных воссоздать в цифровом пространстве цепочку событий, труднореализуемых в натурных испытаниях, но гипотетически возможных в процессе эксплуатации изделия, методом последовательных итераций, передавая измененную геометрию двойника из одной задачи в другую, определяется конечное состояние объекта и выявляются требующие доработки конструктивные элементы.

Комплексное численное моделирование механических воздействий, согласно нормативным документам, состоит из трех различных видов сбрасывания в каждом из критических положений ориентации конструкции при соударении, обоснованных с точки зрения максимального нагружения.

1. При первом виде сбрасывания образец должен упасть на плоскую мишень так, чтобы он получил максимальное повреждение, а высота падения, измеряемая от самой нижней точки образца до верхней поверхности мишени, должна составлять 0,3 м. Реализация данного события может произойти при проведении ТТО в условиях нормальной перевозки.

2. При втором виде сбрасывания образец должен упасть на плоскую мишень, на то же самое пятно контакта, а высота падения должна составлять 9,0 м. Реализация данного события может произойти при проведении ТТО в условиях аварийной перевозки.

3. При третьем виде сбрасывания образец должен упасть на штырь, жестко закрепленный в вертикальном положении на мишени так, чтобы образец получил максимальные повреждения в пятне контакта, деформированном по результатам двух предыдущих сбрасываний, либо в самом уязвимом месте конструкции на данный вариант ориентации конструкции при соударении. Высота падения составлять 1,0 м.

Для обоснования прочности и целостности разрабатываемого УКХ ПВ, при ударных нагрузках высокой интенсивности, использована схема метода конечного элемента (КЭ) [6, 7], реализованная в рамках вычислительного комплекса ANSYS/LS-DYNA [8, 9] (лицензия № D334623 от 02.06.2005).

Для оценки динамической прочности УКХ ПВ и транспортируемой ОТВС, в качестве критерия состояния принята относительная деформация. Условие прочности конструкции имеет вид:

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{пред},$$

где  $\varepsilon$  – интенсивность пластической деформации,  $\varepsilon_{пред}$  – деформация разрушения, определяемая в испытаниях на растяжение цилиндрического образца по относительному сужению  $Z^T$  его поперечного сечения в месте разрыва.

Деформация разрушения определяется по формуле [10]:

$$\varepsilon_{пред} = \ln [1 / (1 - 0,01 \cdot Z^T)].$$

Поскольку образование шейки в цилиндрическом образце характеризуется объемным НДС для определения  $\varepsilon_{пред}$ , применяется экспериментально-расчетный подход, основанный на комплексном использовании натуральных экспериментов и компьютерного моделирования.

### Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается: теоретическими и экспериментальными данными по упругопластическому деформированию многокомпонентных конструкций в условиях ударных нагрузок; экспериментальным исследованием динамических свойств используемых материалов с учетом различных скоростей деформаций и температур с последующей адаптацией и верификацией их математических моделей; использованием верифицированных и аттестованных современных высокопроизводительных ПК.

### Разработка расчетных геометрических моделей

Для обоснования подробной расчетной КЭ модели УКХ ПВ и ОТВС с учетом всех конструктивных особенностей был решен ряд динамических задач как для простых образцов, так и для сложных многокомпонентных конструкций с целью верификации результатов расчетов с результатами аналитических решений и экспериментальных исследований.

Решение рассмотренных задач проводилось в упругой и упругопластической постановках с использованием различных конструкционных материалов.

В качестве одного из примеров верификации на конструкции со сложной геометрией, с учетом всех геометрических особенностей и большого количества контактных пар, было проведено численное и экспериментальное исследование ударного деформирования макета сборки стальной защиты (рис. 1) активной зоны реактора БН-800 (далее – макеты ССЗ).

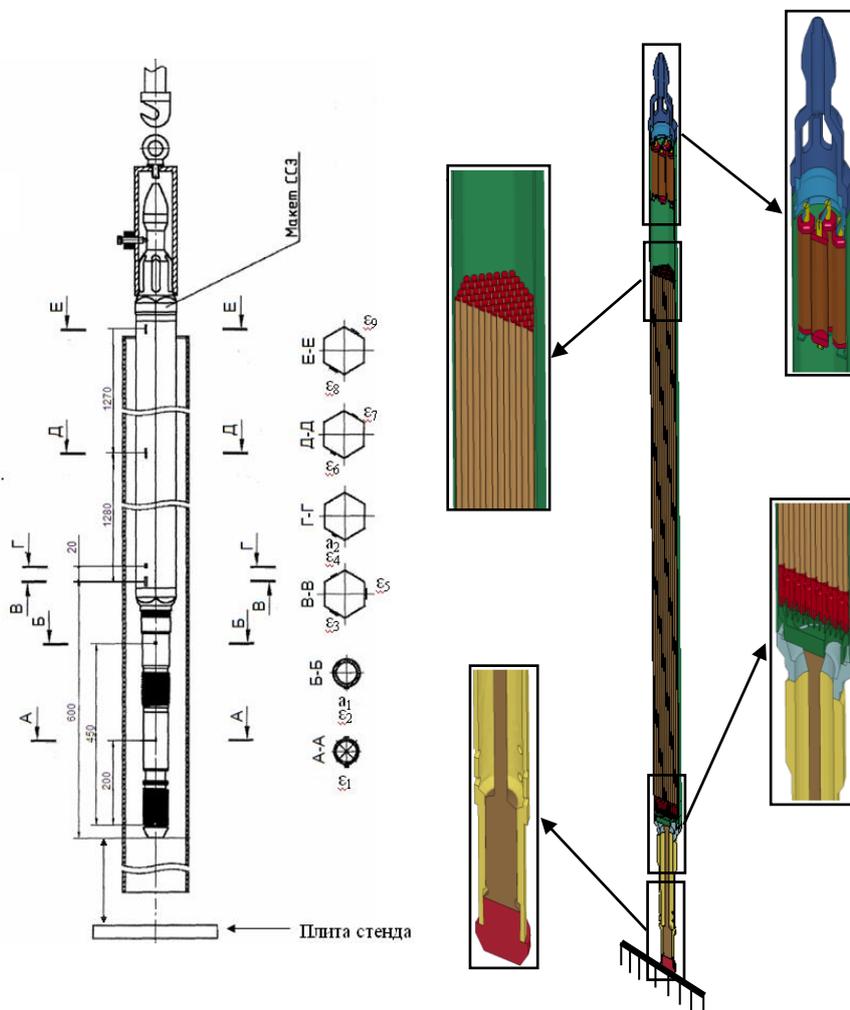


Рис. 1. Макет и расчетная модель ССЗ 927М.04.000 реактора БН-800

Fig. 1. The BN-800 reactor's 927M.04.000 Steel Shield Subassemblies (SSSA) test sample and computational model

Натурные эксперименты выполнены на базе экспериментальной лаборатории АО «ОКБМ Африкантов». Испытания на воздействие продольных ударных нагрузок проводились на копре свободного падения СТ-675 (копер К-4000). Измерения деформаций, возникающих в макетах ССЗ при воздействии продольных ударных нагрузок, проводили методом тензометрии с использованием тензорезисторов типа FLA-5-11 и статодинамического информационно-измерительного комплекса MGSplus. Для оценки ускорений использовалась измерительная система: акселерометры типа 4339, измерительно-вычислительный комплекс МИС-200 с усилителем заряда ME-908. Высота падения варьировалась в интервале от 100 до 1500 мм. В процессе испытаний фиксировались деформации и ускорения, производился визуальный осмотр макетов. В табл. 1, 2 сопоставляются результаты расчетов и испытаний для макета ССЗ.

**Таблица 1.**  
**Напряжения в макете ССЗ, усредненные по сечению А-А**

**Table 1.**  
**Stresses in the SSSA test sample averaged over section A-A**

Высота падения, мм	100	200	300	400	500	1000	1500
Эксперимент	-72	-95	-129	-164	-225	-237	-410
Расчет	-79	-100	-140	-176	-230	-259	-383

**Таблица 2.**  
**Ускорения а (g) макета ССЗ, усредненные по сечению Б-Б**

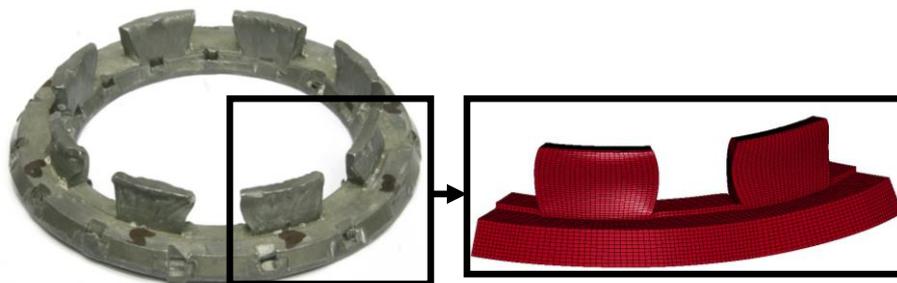
**Table 2.**  
**Accelerations a (g) of the SSSA test sample averaged over section B-B**

Высота падения, мм	100	200	300	400	500	1000	1500
Эксперимент	1134	1686	1980	2448	2696	3558	1648
Расчет	1132	1537	2012	2457	2723	3472	1562

В процессе серии предварительных тестовых расчетов была использована последовательность КЭ сеток с различной плотностью и уменьшающимися шагами по размеру ячейки. При этом с уменьшением шага было обеспечено увеличение частоты узлов сетки в под областях с наибольшими градиентами деформаций. Анализ результатов, полученных при различных вариантах размера элементов сетки, показал, что при уменьшении выбранного размера параметры контроля сходимости остаются в пределах интервала заданной допустимой погрешности.

Из сопоставления видно, что осевые напряжения и ускорения, определенные экспериментально и численно, качественно и количественно удовлетворительно совпадают (их расхождение не превышает 10 %). По результатам верификации результатов сложной модели макета ССЗ 927М.04.000 было сформировано представление о размерах и частоте КЭ сетки, отработано моделирование резьбовых и сварных соединений, различных концентраторов, взаимодействие контактных пар с разными характеристиками материалов.

Натурный эксперимент, подтверждающий работоспособность и эффективность демпфирующего устройства со скоростями соударений, присутствующих в эксплуатируемом изделии со значительными пластическими деформациями, был проведен на экспериментальной базе АО «ОКБМ Африкантов». Он был оцифрован в виде 3-D модели и граничных условий, имитирующих реальное нагружение образца. Верификация, проведенная по замерам остаточной формы после ударного воздействия (рис. 2), показала удовлетворительную сходимость (табл. 3) с разницей результатов, не превышающей 2 %.



**Рис. 2.** Сравнение остаточной формы демпфера, полученной по результатам эксперимента и расчета

**Fig. 2.** Comparison of the damper residual shape obtained by experiment and calculation

**Таблица 3.**  
**Сравнение результатов расчета с результатами эксперимента**

**Table 3.**  
**Comparison of calculation and experimental results**

Параметр	Эксперимент	Расчет	Расхождение
Ширина зуба – $\Delta x$ , мм	25,56	25,11	1,8 %
Высота зуба – $\Delta h$ , мм	11,50	11,43	0,6 %
Высота демпфера – $\Delta l$ , мм	18,11	17,81	1,7 %

Спектр выбранных верификационных примеров позволил создать подробные модели УКХ ПВ и ОТВС, учитывая сложное конструктивное исполнение и контактную нелинейность их составных частей. Построение расчетных моделей, предназначенных для анализа падений УКХ ПВ в различных положениях, осуществлено в соответствии с принципами современной САД/САЕ технологии. Геометрические 3D-модели УКХ ПВ и ОТВС с различными обоснованными допущениями разработаны в среде ANSYS/WORKBENCH (рис. 3). Расчетная модель УКХ ПВ состоит примерно из 3,7 млн КЭ, расчетная модель ОТВС – из 4,1 млн КЭ. Каждая из составляющих данных моделей задана отдельными компонентами с индивидуальными характеристиками конструкционных материалов, отображающими реальные свойства. Контактный алгоритм подобран таким образом, чтобы учитывать взаимосвязи не только сопряженных частей конструкции, но и формоизменение численной модели, когда отдельные области одного тела начинают взаимодействовать между собой, что крайне актуально при значительных деформациях.

Размер шага сброса данных по НДС расчетных моделей в процессе соударения для формирования файлов в постпроцессоре подобран с такой частотой, чтобы происходило не менее 1-2 сбросов при прохождении ударной волны по конструкции в каждом из направлений, распространяемой со скоростями с учетом используемых материалов.

### **Разработка математических моделей поведения конструкционных материалов**

Одним из наиболее важных этапов численного моделирования поведения конструкций транспортных контейнеров при динамических воздействиях с высокими перегрузками является применение математических моделей материалов, адекватно описывающих процессы упругопластического деформирования различных конструктивных элементов с использованием фактических механических характеристик в зависимости от скорости деформации и температуры.

Основной корпус с наибольшей металлоемкостью из всей конструкции, отвечающий за герметичность внутреннего содержимого, выполнен из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ). Крышки, клапаны, демпферы и корпус нейтронной защиты, отвечающие за герметичность и демпфирующие способности изделия, изготовлены из стали 08X18H10T. Крепежные элементы УКХ ПВ, отвечающие за герметичность всех разъемных соединений в УКХ ПВ, в первую очередь, за основной разъем, изготовлены из стали 20X13.

Актуальными становятся задачи по получению фактических диаграмм деформирования экспериментальным методом, идентификации моделей поведения материалов путем верификации расчетных и экспериментальных данных при различных механизмах деформирования и адаптации этих моделей для условий, в которых будет эксплуатироваться проектируемое изделие.

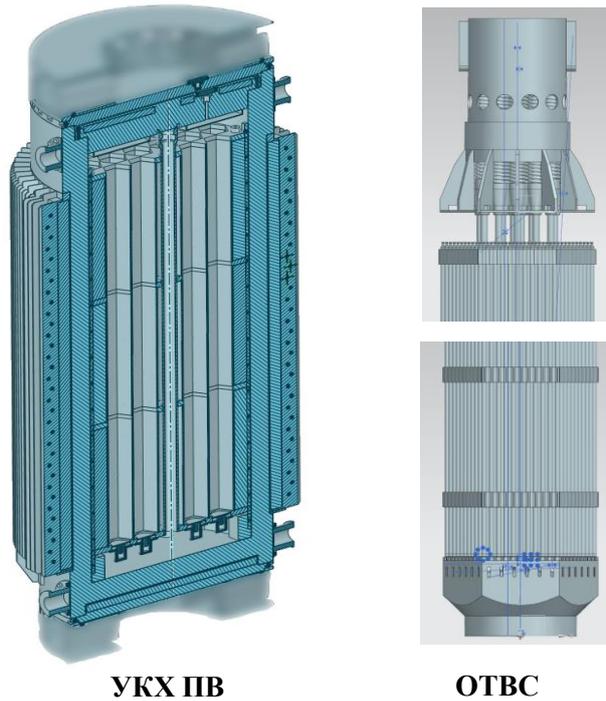


Рис. 3. Расчетные модели УКХ ПВ и ОТВС

Fig. 3. Extended-Capacity Packing Storage Set (ECPSS) and Spent Fuel Assembly (SFA) computational models

Для определения механических характеристик перечисленных материалов при высоких скоростях нагружения использовались стержни Гопкинсона с различными разрезами по схеме Николаса и методу Кольского [11-14], реализованному на экспериментальной установке, для испытаний при растяжении-сжатии (рис. 4).

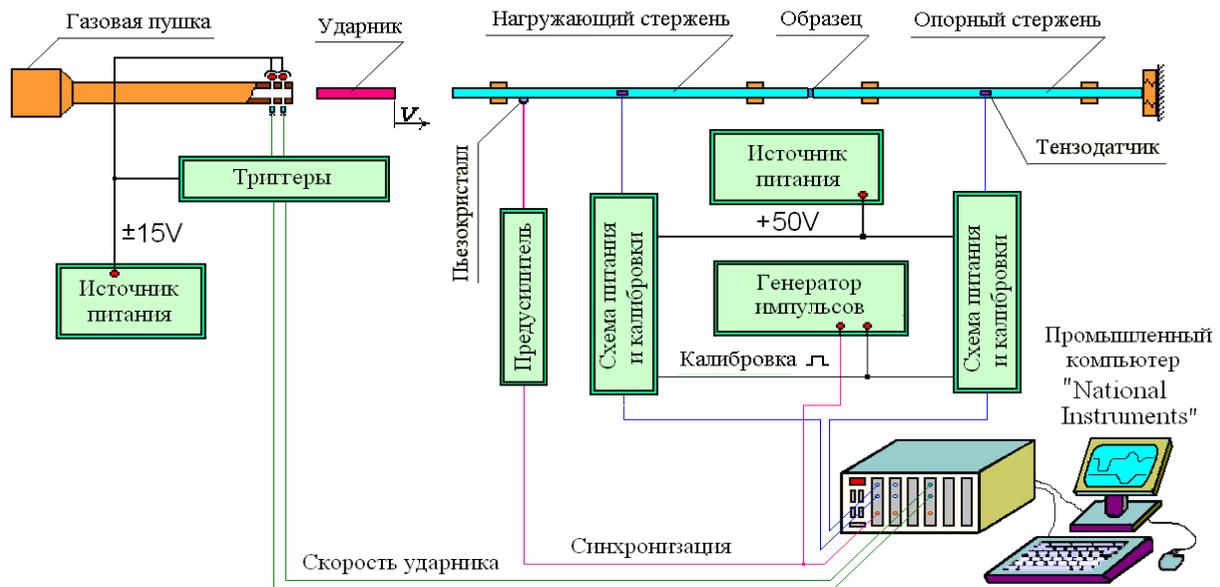
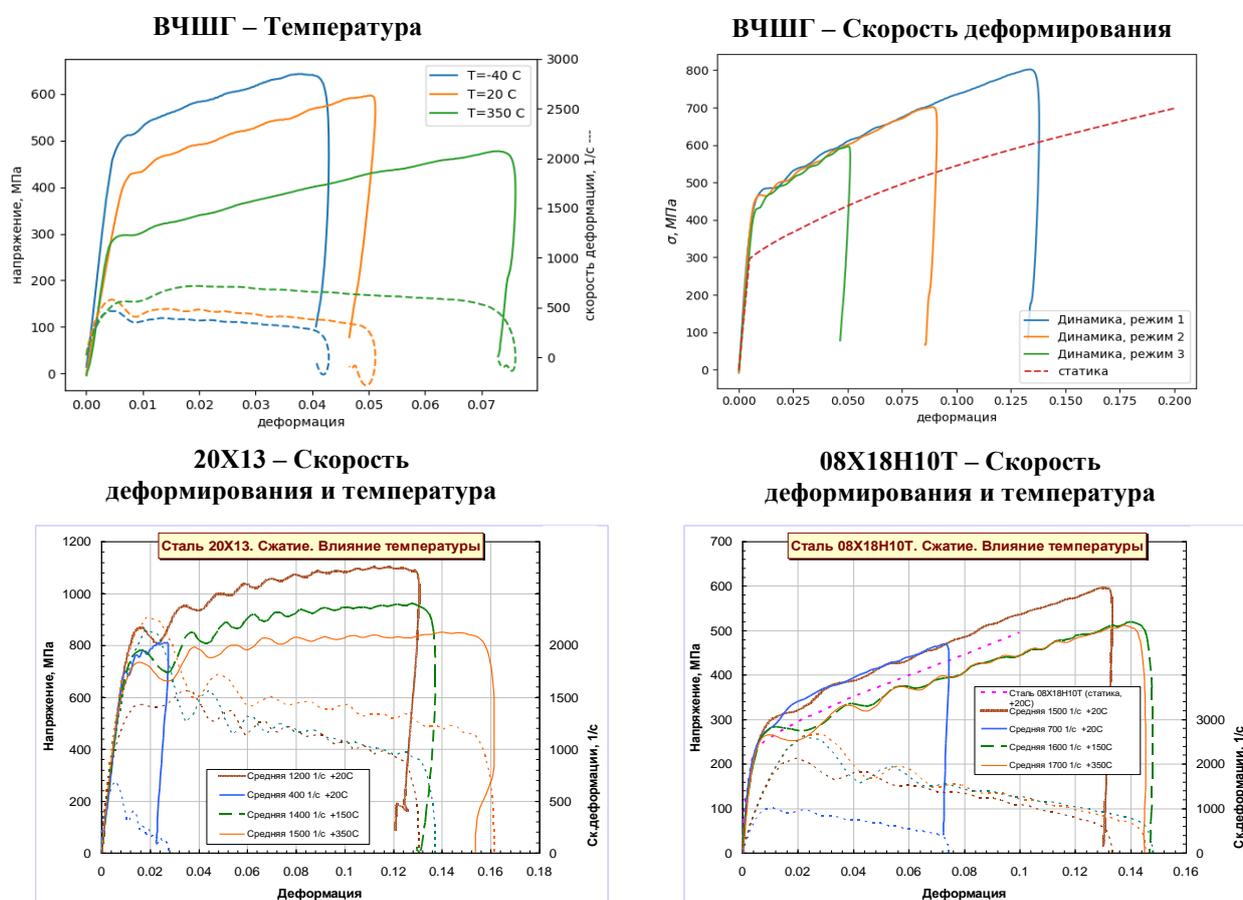


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для испытаний материалов

Fig. 4. Schematic diagram of experimental facility for materials testing

В результате получены диаграммы деформирования при различных режимах нагружения. По ним определены пределы прочности и их зависимость от скоростей деформаций и температуры (рис. 5). Данные исследования подробно рассмотрены в трудах [15, 16].



**Рис. 5. Диаграммы деформирования, полученные экспериментально для материалов ВЧШГ, 08X18N10T и 20X13**

**Fig. 5. Deformation diagrams obtained experimentally for high-strength cast iron with spheroidal graphite, 08Cr18Ni10Ti and 20Cr13**

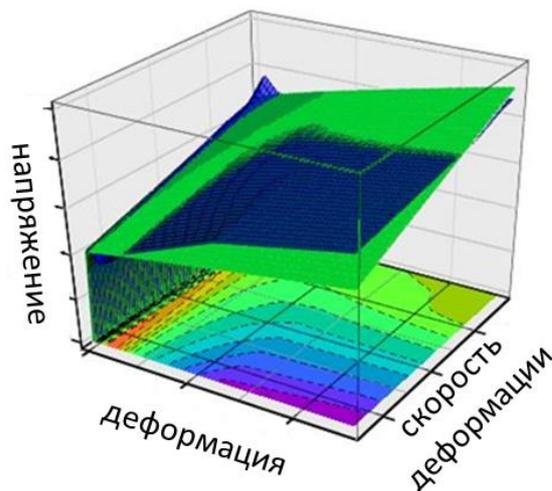
Для анализа изменения прочности в широком диапазоне скоростей деформации сопоставлены результаты статических и динамических экспериментов. Механические характеристики конструкционных материалов (диаграммы деформирования, пределы текучести, пределы прочности, модуль упрочнения, предельные характеристики пластичности и т.д.) определены по результатам статических и динамических испытаний образцов при сжатии и растяжении, также получены параметры модели пластичности Джонсона-Кука [17]. Отмечено, что исследованные стали имеют различную чувствительность механического поведения к скорости деформации и температуре. Так, динамическая диаграмма деформирования, соответствующая скорости деформаций  $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$ , для ВЧШГ выше статической кривой на 60 %, для стали 20X13 – на 33 %, а для стали 08X18N10T – на 8 %. В условиях повышенных температур (до  $350^\circ \text{C}$ ) пределы текучести уменьшились: для ВЧШГ – на 33 %; для стали 20X13 – на 23 %; для стали 08X18N10T – на 20 %.

Динамические характеристики ВЧШГ были исследованы впервые.

Наибольшая актуальность таких моделей имеет место для элементов конструкции, испытывающих деформации, близкие к предельным значениям (демпферы, корпус нейтронной защиты и крепеж) и изготовленные из стали 08X18N10T и 20X13. Консерватизм с ис-

пользованием минимальных механических характеристик материала для демпфирующих элементов не уместен, ввиду получения слишком «мягкого» демпфера. С целью адаптации модели пластичности Джонсона-Кука (рис. 6) под ударные механические воздействия высокой степени интенсивности для сталей 08X18H10T и 20X13 были использованы эксперименты на высокоскоростное внедрение инденторов со сферической и конической головными частями, а также на динамическое сжатие цилиндрического образца в виде таблетки.

Результаты верификации модели деформирования показали хорошее соответствие данных натурных испытаний и численного моделирования как по остаточным формам образцов, так и по временным характеристикам динамики процесса пластического деформирования – их расхождение не превысило 10 %. Данные подробно изложены в [16].



**Рис. 6. Экспериментально определенная поверхность зависимости напряжения течения от пластической деформации и скорости деформации**

**Fig. 6. Surface of flow stress determined experimentally as a function of plastic strain and strain rate**

Динамические характеристики материалов, из которых изготовлены элементы рассматриваемой в данной работе ОТВС, не были исследованы. Ввиду того, что ОТВС находятся внутри контейнера, высоких скоростей деформирования элементов ОТВС не ожидается. В связи с этим для построения расчетной модели применялись статические характеристики материалов с использованием билинейной модели упругопластического деформирования с линейным изотропным упрочнением. Свойства материалов, применяемых в ОТВС, определялись с учетом влияния доз радиационного воздействия для каждого конкретного элемента [18]. Совокупность полученных на образцах экспериментальных данных, идентифицированных и верифицированных математических моделей (в виде определяющих соотношений теории течений), свидетельствует о целесообразности применения данных моделей для расчетного анализа НДС транспортных контейнеров и их внутреннего содержимого в условиях динамических воздействий высокой интенсивности.

### **Разработка граничных условий для цифровых двойников**

Для анализа НДС УКХ ПВ и ОТВС при комплексном воздействии использовалась КЭ модели с наложением на них различных параметров исходных событий в виде граничных условий. Все варианты комплексных воздействий с приложенными граничными условиями к расчетным моделям, показаны на рис. 7.1 и 7.2.

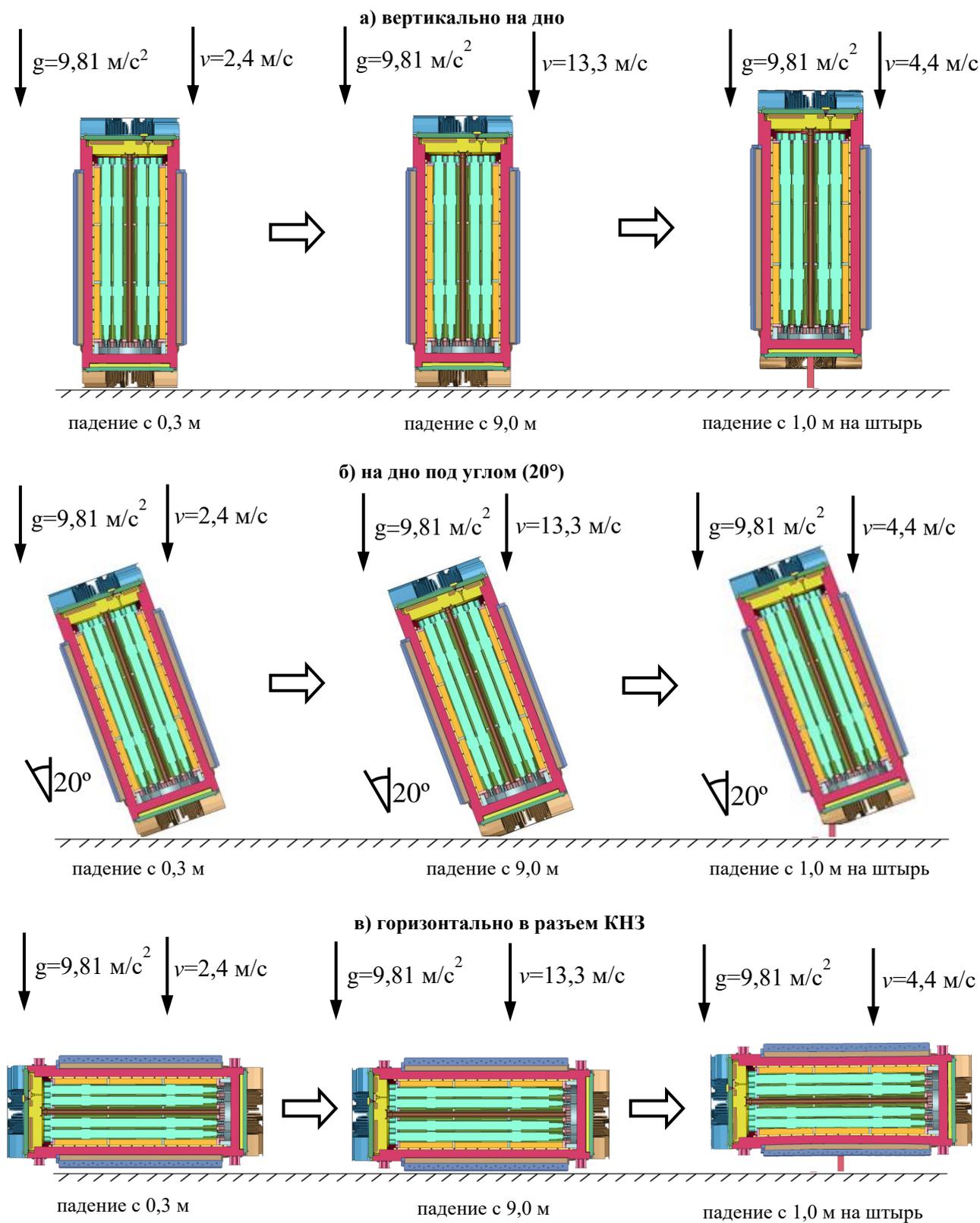


Рис. 7.1. Расчетные варианты комплексных падений УКХ ПВ (лист 1)

Fig. 7.1. Calculated options of ECPSS complex falls (sheet 1)

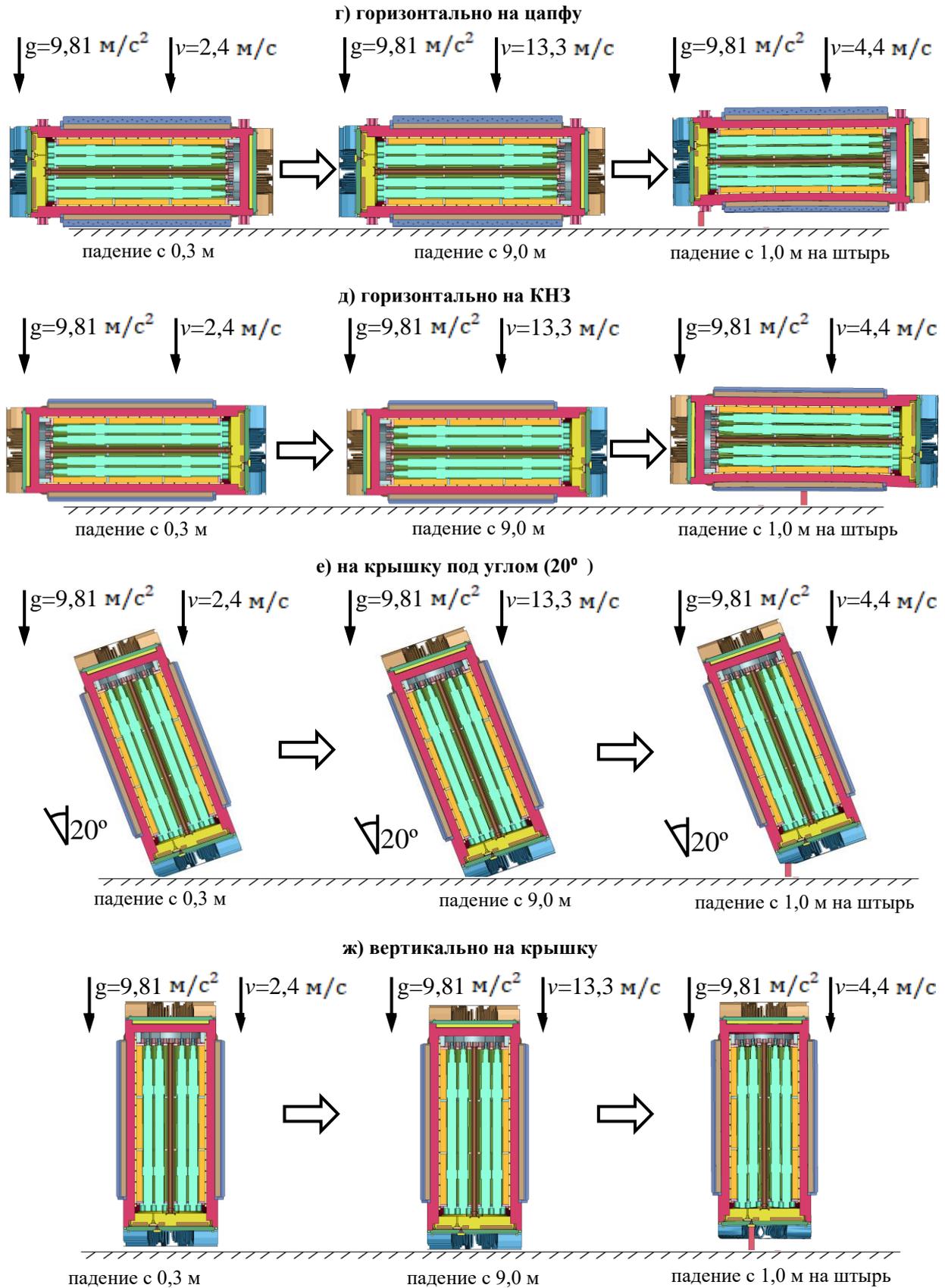
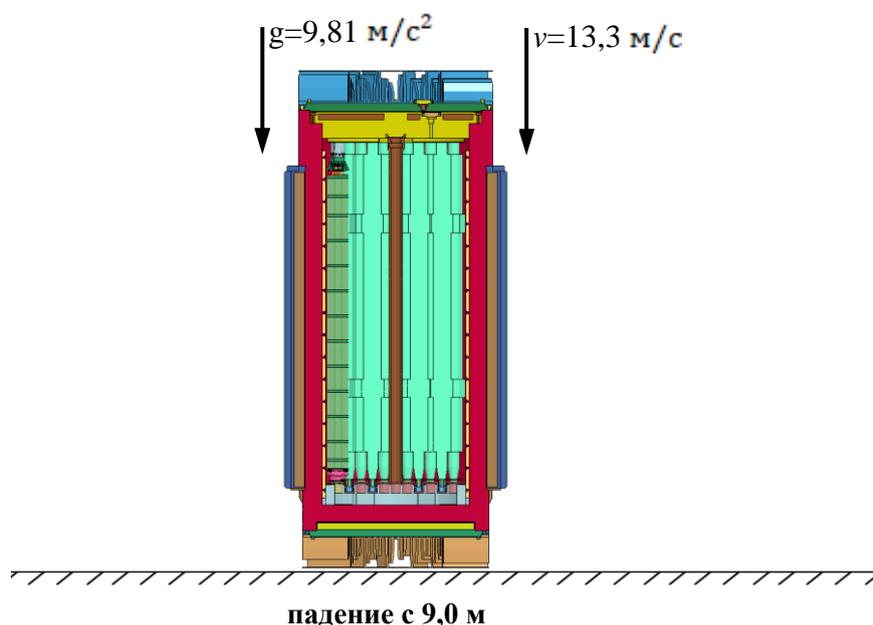


Рис. 7.2. Расчетные варианты комплексных падений УКХ ПВ (лист 2)

Fig. 7.2. Calculated options of ECPSS complex falls (sheet 2)

Варианты падений расчетной модели УКХ ПВ с помещенной в него полноценной расчетной моделью ОТВС вместо одного из макетов показаны на рис. 8.

а) вертикально на дно с подробной моделью ОТВС



б) горизонтально на КНЗ с подробной моделью ОТВС

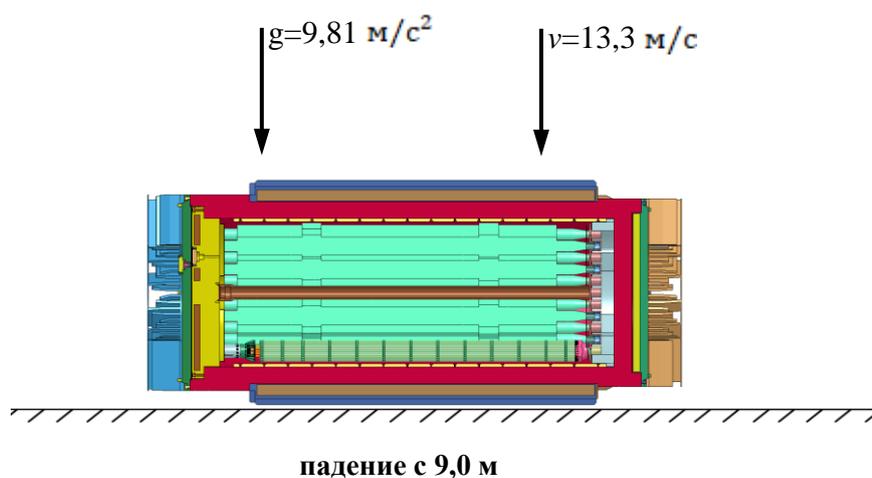


Рис. 8. Расчетные варианты падения УКХ ПВ с подробной моделью ОТВС

Fig. 8. Calculated options of ECPSS fall with a detailed SFA model

В соответствии с нормативными документами и разработанной методологией испытания на аварийные условия, перевозки должны выполняться после испытаний на нормальные условия и в численном исследовании выполняться комплексно в единой задаче. Соответственно, падение УКХ ПВ должно проводиться в последовательности: 0,3 м → 9,0 м → 1,0 м на штырь. При рассмотрении комплексных воздействий для каждого последующего этапа в качестве начального состояния УКХ ПВ принимается деформированное состояние, полученное от предыдущего этапа.

В качестве параметров исходных событий рассматривалось следующие варианты комплексных воздействий УКХ ПВ в соответствии с нормативными требованиями:

- вертикальное падение на дно с высоты 0,3 м → 9,0 м → 1,0 м на штырь;
- падение под углом на дно с высоты 0,3 м → 9,0 м → 1,0 м на штырь;
- падение горизонтально на разъем КНЗ с 0,3 м → 9,0 м → 1,0 м на штырь;
- падение горизонтально на разъем КНЗ с высоты 0,3 м → 9,0 м → 1,0 м цапфой на штырь;
- падение горизонтально на КНЗ с высоты 0,3 м → 9,0 м → 1,0 м на штырь;
- падение под углом на крышку с высоты 0,3 м → 9,0 м → 1,0 м на штырь;
- вертикальное падение на крышку (в место расположения клапана) с высоты 0,3 м → 9,0 м → 1,0 м на штырь.

Каждый вариант падения обоснован с точки зрения наихудших последствий либо для самого УКХ ПВ, либо для его внутреннего содержимого.

Также было рассмотрено падение УКХ ПВ с помещенной подробной моделью ОТВС вместо одного из макетов с высоты 9,0 м на жесткое основание, с учетом облученных характеристик материалов сборки, в положениях, создающих максимальные перегрузки на ОТВС. На момент моделирования броска с 9,0 м УКХ ПВ находился в преднапряженном состоянии после падения с 0,3 м.

Последовательность падений 0,3 м → 9,0 м → 1,0 м на штырь при комплексных воздействиях выбрана таким образом, чтобы нанести максимальные повреждения конструкции УКХ ПВ, так как локальное воздействие штыря при соударении с деформированной конструкцией оказывает на нее большее влияние, чем воздействия, совершенные в последовательности 0,3 м → 1,0 м на штырь → 9,0 м.

### **Анализ напряженно-деформированного состояния УКХ ПВ и ОТВС**

По разработанной методологии проведено численное исследование НДС УКХ ПВ (рис. 9), и обоснована целостность ОТВС (рис. 10) в соответствии требованиями нормативных документов. В рассмотренных вариантах падения с высоты 0,3 м при нормальных условиях перевозки УКХ ПВ удовлетворяет условиям динамической прочности, сохраняя свою целостность и исключая выход радиоактивного содержимого наружу. Незначительные изменения геометрии демпферов (для случаев с вертикальными падениями и падениями под углом) и локальные помятости ребер КНЗ (для случая с горизонтальным падением) подразумевают дальнейшую эксплуатацию УКХ ПВ.

Для вариантов падений с высоты 9,0 м и 1,0 м на штырь при аварийных условиях перевозки УКХ ПВ удовлетворяет условиям динамической прочности, сохраняя свою целостность и исключая выход радиоактивного содержимого наружу. Пластические деформации в конструктивных элементах, создающих герметичный контур, не достигают предельных значений; сквозного разрушения не происходит.

При анализе НДС подробной модели ОТВС со смоделированным топливом в максимально нагруженных твэлах показано, что все элементы ОТВС удовлетворяют условиям динамической прочности, сохраняя свою целостность и исключая выход радиоактивного содержимого наружу. Разрушения твэлов не ожидается.

В результате рассмотренных серий последовательных падений, выполненных по разработанной методологии, полученные изменения геометрии каждого из конструктивных элементов позволили сформировать исходные данные для дальнейшего обоснования ядерной и радиационной безопасности УКХ ПВ.

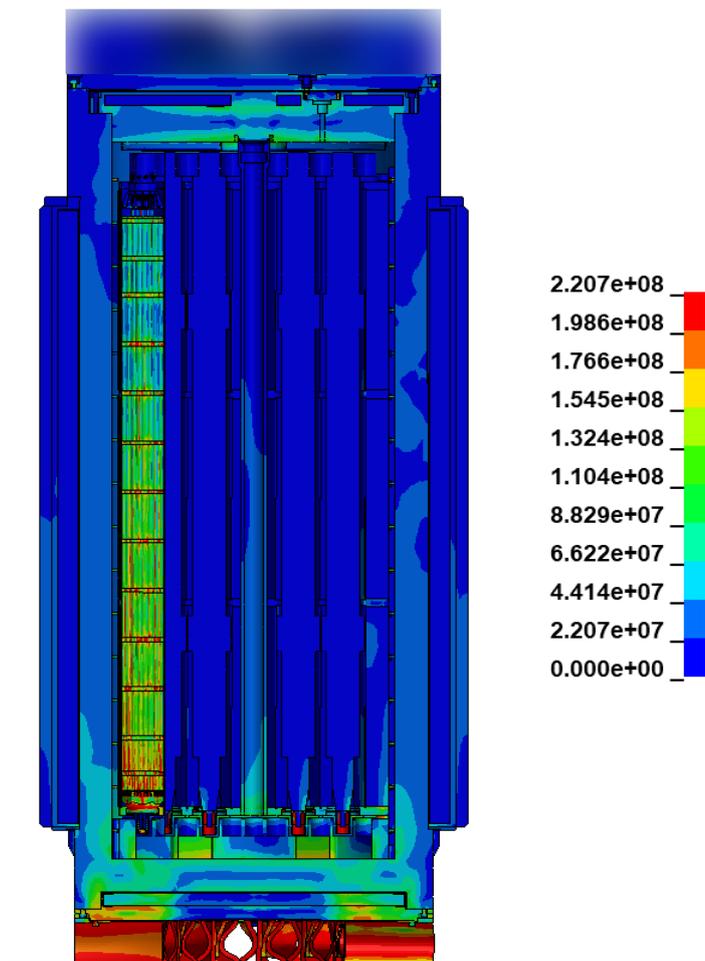


Рис. 9. Напряженно-деформированное состояние УКХ ПВ с помещенной моделью ОТВС, при вертикальном падении на дно

Fig. 9. Stress-strain state of the ECPSS with the SFA model inside at vertical fall to the bottom

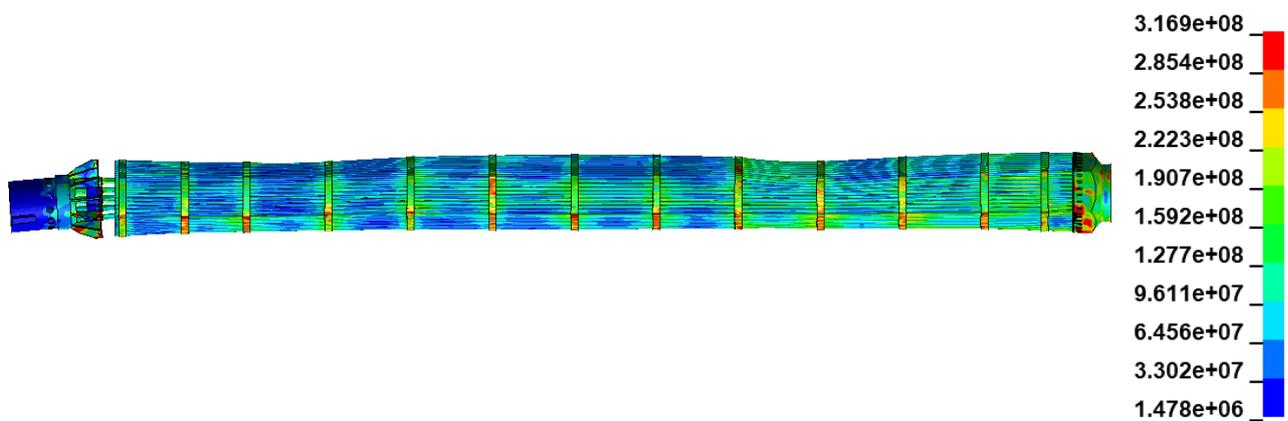


Рис. 10. Напряженно-деформированное состояние ОТВС при горизонтальном падении

Fig. 10. Stress-strain state of the SFA at horizontal fall

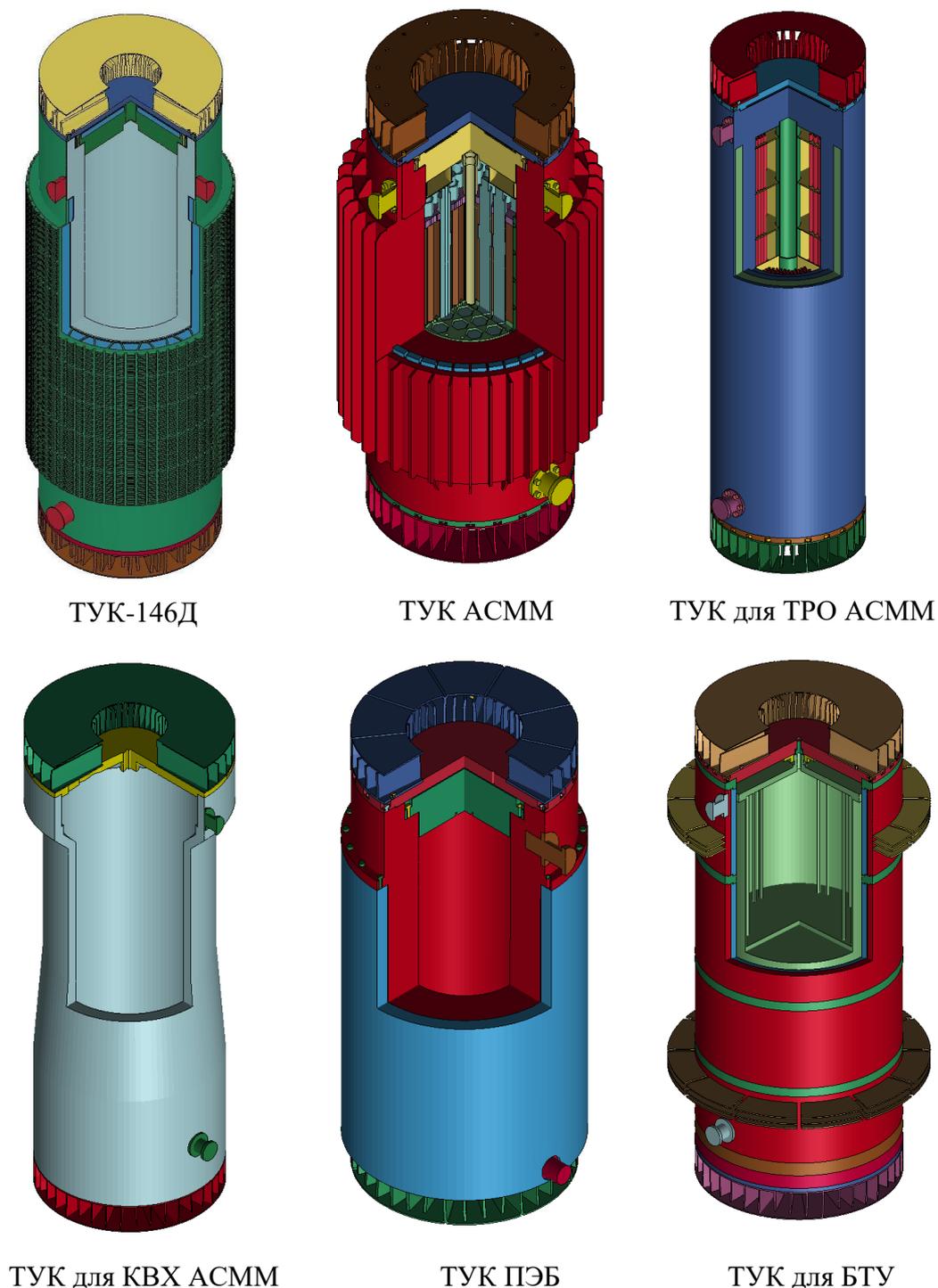


Рис. 11. Общий вид ТУК, проектируемых в АО «ОКБМ Африкантов»

Fig. 11. General view of the transportation packaging sets designed at ОКБМ Afrikantov

### Заключение

Проведено подробное численное исследование НДС УКХ ПВ, которое легло в основу формирования конечного облика конструкции. Обоснована целостность ОТВС в составе УКХ ПВ при падениях в различных положениях. Данные исследования стали возможными благодаря разработанной методологии, учитывающей геометрические особенности конструкций, фактические характеристики используемых материалов и заложенные граничные

условия, включающие в себя целый ряд исходных событий в едином сценарии. Созданные цифровые двойники позволили получить достоверные результаты с учетом всего спектра возможных механических воздействий высокой степени интенсивности, которые возникают при падениях в течение эксплуатационного периода.

В результате примененных подходов в разрабатываемый УКХ ПВ был внесен целый ряд конструктивных изменений, позволивших сбалансировать конструкцию по металлоемкости и демпфирующим способностям без ущерба для прочностных характеристик. В частности, по результатам падений в вертикальных положениях и под углом были разработаны: демпфирующее устройство, эффективно поглощающее кинетическую энергию (патент на изобретение RU2774084C2 «Торцевой демпфер контейнера»), а также крышка и элементы креплений всех разъемов; по результатам горизонтальных падений – были доработаны цапфы, ребра, разъем и крепление КНЗ, чехол для ОТВС.

Подходы, применяемые в разработанной методологии, нашли реализацию при проектировании целого ряда транспортных контейнеров для транспортировки и хранения ОЯТ и РАО. В настоящий момент АО «ОКБМ Африкантов» разрабатывает целый ряд изделий, относящихся к ТУК различного назначения (рис. 11), для АЭС с различными видами теплоносителей (ТУК-146Д, ТУК для АСММ, ТУК для ТРО АСММ, ТУК для КВХ АСММ, ТУК для ПЭБ «Академик Ломоносов», ТУК БТУ). Изобретенное запатентованное демпфирующее устройство с высокими поглощающими способностями и контролируемыми процессами деформирования на данный момент применяется при проектировании целого ряда аналогичных изделий. Данное оборудование подлежит обязательной сертификации, которая подразумевает проведение натурных испытаний, в результате которых должна быть подтверждена прочность и надежность испытываемого изделия. В результате недостаточной проработки конструкции по устаревшим методикам не исключен отрицательный результат таких испытаний, что приведет к существенным финансовым потерям. За счет разработанной и реализованной методологии на основе полноценных математических исследований на стадии проектирования сформирован конечный облик конструкций, который позволит обойтись без промежуточных натурных испытаний, что сильно сэкономит временной и финансовый ресурсы, и выйти на процесс сертификации с минимизированными экономическими затратами, что позволит снизить себестоимость разрабатываемого изделия, повысив его конкурентоспособность.

### Библиографический список

1. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), «Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов» НП-053-16, Москва, 2016 год.
2. МАГАТЭ, «Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов», SSR-6 (Rev.1), МАГАТЭ, Вена, 2018 год.
3. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций», НП-001-15.
4. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, «Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла», НП-016-05.
5. **Гусаков-Станюкович, И.В.** Развитие контейнеров для отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов типа ВВЭР с 2016 года и на горизонте до 2035 года / И.В. Гусаков-Станюкович, С.В. Комаров, М.Е. Буду // Научно-деловой портал «Атомная энергия 2.0», 2024 г.
6. **Баженов, В.Г.** Конечно-элементный анализ высокоскоростного удара о преграду транспортного упаковочного комплекта / В.Г. Баженов, А.И. Кибец, Ю.И. Кибец, П.В. Лаптев, А.А. Рябов, В.И. Романов, Г.И. Сотсков // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 2. С. 118-125.
7. **Рябов, А.А.** Компьютерное моделирование поведения системы демпфирования защитного контейнера при его падениях / А.А. Рябов, В.И. Романов, Г.И. Сотсков, С.Г. Скурихин, А.И. Барчен-

- ков, А.И. Моренко // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Механика. 2000. № 2. С. 98-102.
8. LS-DYNA 960 Keyword User's Manual. Livermore Software Technology Corporation. 2001.
  9. Программный комплекс ANSYS. Аттестационный паспорт программного средства №327 от 23.07.2024 г.
  10. **Надаи, А.** Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – М, Издательство иностранной литературы, 1954.
  11. **Кольский, Г.** Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // Механика. 1950. № 4. С. 108-119.
  12. **Брагов, А.М.** Особенности построения диаграмм деформирования методом Кольского / А.М. Брагов, А.К. Ломунов // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Статика и динамика деформируемых систем: Всесоюз. межвуз. сб. Горьк. ун-т. 1984. С. 125-137.
  13. **Bragov A.M., Lomunov A.K.** Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. Int. J. of Impact Engineering, 1995. 16(2), pp. 321-330.
  14. **Nicholas T.** Tensile testing of materials at high rates of strain. Exp. Mech. 1981. Vol. 21. № 5. Pp. 177-195.
  15. **Константинов, А.Ю.** Экспериментально-расчетное исследование поведения конструкционных материалов под действием динамических нагрузок: Дисс... канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2007.
  16. **Лапшин, Д.А.** Экспериментально – расчетное исследование процессов упругопластического деформирования внутриобъектовых транспортных контейнеров типа БН в авариях с падением: Дисс...канд. техн. наук – Н. Новгород, 2015.
  17. **Cowper, G.R.** and P.S. Symonds, "Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams", Brown University, Applied Mathematics Report, 1958.
  18. Национальный стандарт Российской Федерации, Устройства внутрикорпусные водо-водяного энергетического реактора, Расчет на прочность на стадии проектирования, ГОСТ Р 59429-2021.

*Дата поступления  
в редакцию: 28.03.2025*

*Дата принятия  
к публикации: 05.05.2025*