

ДЕМПФИРОВАНИЕ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО ВТУК ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Виленский О.Ю., Душев С.А., Лапшин Д.А., Шорохов В.В.
(АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Россия)

Введение

Современный этап развития атомной энергетики характеризуется повышенными требованиями безопасности, предъявляемыми к объектам использования атомной энергии. Особое значение на данных объектах имеют аварийные ситуации, связанные с падением оборудования и падением различных предметов на оборудование атомных станций (АС) при реализации различных сценариев в процессе эксплуатации АС, что может привести к серьезным радиационным последствиям. В соответствии с НП-018-05 «Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности атомных станций с реакторами на быстрых нейтронах», оценка безопасности должна включать анализ реакций систем и сооружений АС на возможные исходные события.

Для транспортирования радиоактивных материалов применяют специально разработанные для этого контейнеры, которые входят в состав внутриобъектового транспортного упаковочного комплекта (ВТУК). ВТУК – комплекс технических средств, используемых для размещения свежего или отработавшего ядерного топлива, обеспечивающий ядерную и радиационную безопасность, а также сохранность ядерного топлива при хранении и транспортировании по территории объектов использования атомной энергии.

В основе разработки ВТУК лежат требования нормативной документации (НП-061-05, НП-018-05, НП-001-15) и анализ напряженно-деформированного состояния конструкции при динамических воздействиях высокой интенсивности.

ВТУК является сложным и дорогостоящим изделием, к которому предъявляются повышенные требования безопасности. Например, ВТУК должен отвечать требованиям динамической прочности при воздействии ударных нагрузок и обладать при этом определенными демпфирующими качествами, снижающими внешние динамические нагрузки. В соответствии с требованиями НП-061-05, при проведении технологических и транспортных операций должна исключаться как возможность выпадения, так и нарушение расположения ядерного топлива внутри контейнера. Выполнение подобных требований возможно, прежде всего, в случае сохранения целостности (герметичности) ВТУК и отсутствия недопустимого формоизменения.

Системы хранения и транспортирования ядерного топлива должны быть способны выполнять свои функции в установленном проектом объеме с учетом всех внутренних и внешних воздействий, учитываемых в проекте. Отдельно выделяется группа режимов, включающая аварии, связанные с падением оборудования в процессе выполнения транспортно-технологических операций.

Упомянутые выше требования по обеспечению безопасности ВТУК предусматривают подтверждение его показателей безопасности путем проведения испытаний на ударные воздействия по регламентируемым нормативным требованиям, в частности при падении ВТУК на жесткую плиту с определенной высоты в различных положениях. Однако натурные испытания ВТУК и его отдельных элементов в процессе проектирования и отработки конструкции затруднены, прежде всего, в силу их значительной стоимости.

В подобных обстоятельствах особую значимость приобретает возможность отработки конструкции на стадии проектирования путем выполнения представительных расчетных исследований [1-2]. Подобный анализ, связанный с исследованием

высоконелинейных динамических процессов деформирования металла, стал возможен в последнее время благодаря исследованиям процессов деформирования и разрушения твердых тел в условиях интенсивных динамических нагрузок и разработке на этой основе соответствующих математических моделей и вычислительных комплексов (ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS и др.). Реализуемое в подобных программных комплексах полномасштабное математическое 3D-моделирование позволяет выполнять достаточно глубокий и детальный анализ динамических процессов, сократить сроки проектирования и снизить стоимость проекта [1–4].

Данная работа посвящена математическому исследованию безопасности ВТУК в условиях различных вероятных вариантов падения в процессе транспортно-технологических операций, оценке целостности, демпфирующей способности имеющихся элементов ВТУК. Также проведен анализ при включении в состав ВТУК демпфирующего элемента, предназначенного для снижения динамических нагрузок при падении.

Расчетный анализ падения ВТУК проведен с использованием программного комплекса (ПК) ANSYS/LS-DYNA [5].

Математическое описание динамических процессов пластического деформирования конструкций сводится к решению трехмерных нестационарных задач механики деформируемого твердого тела.

1. Материалы и методы

Минимальные физико-механические характеристики конструкционных материалов при расчетной температуре 200 °С (табл. 1) приняты в соответствии с ПНАЭ Г-7-002-86 «Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок».

Таблица 1

Физико-механические характеристики материалов

Конструктивный элемент	Марка материала	E , ГПа	R_m^T , МПа	$R_{p0,2}^T$, МПа	μ	Z , %	$\varepsilon_{пред}$, %
Корпусные элементы	08X18H10T	190	417	181	0,3	40	51
Элементы крепежа	20X13	210	687	520	0,3	45	60
Вытеснитель	АМг6.Б 60	55	195	125	0,24	35	43

В таблице 1 используются следующие обозначения:

E – модуль упругости материала;

R_m^T – минимальное значение временного сопротивления;

$R_{p0,2}^T$ – минимальное значение предела текучести;

μ – коэффициент Пуассона;

Z – относительное сужение поперечного сечения образца в месте разрыва при статическом разрушении;

$\varepsilon_{пред}$ – деформация разрушения.

Для всех материалов в расчете использована модель упругопластического деформирования материала с линейным изотропным упрочнением. Модель деформирования с изотропным упрочнением рекомендуется использовать, когда имеют место большие деформации.

Модели упругопластического деформирования материалов представлены на рис. 1–3.

В качестве предельного состояния материала принимается деформация разрушения $\varepsilon_{пред}$ при кратковременных стандартных испытаниях на растяжение образца. Для используемых материалов, она определена по относительному поперечному сужению Z сечения образца в месте разрыва [6]:

$$\varepsilon_{пред} = \ln\left(\frac{1}{1 - 0,01 \cdot Z}\right) \cdot 100\% .$$

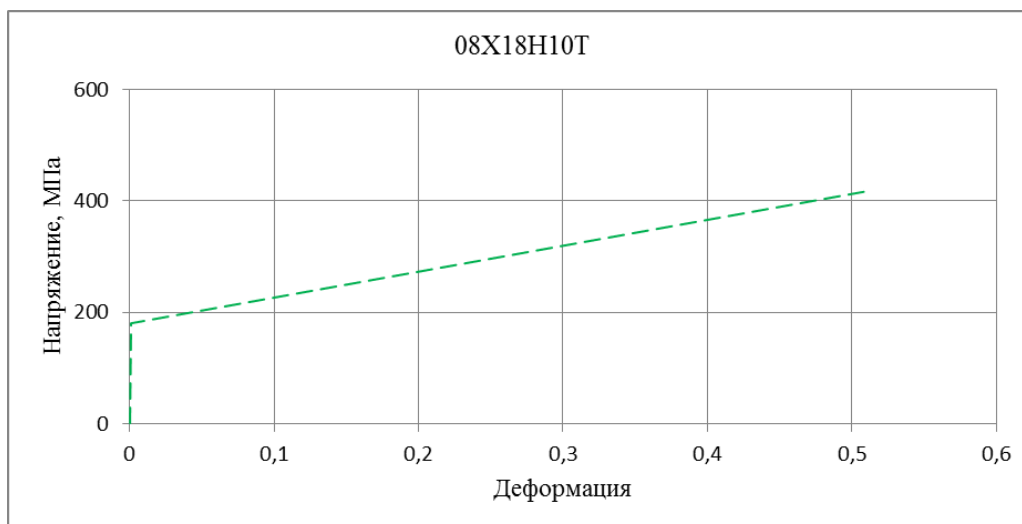


Рис. 1. Модель упругопластического деформирования стали 08X18H10T

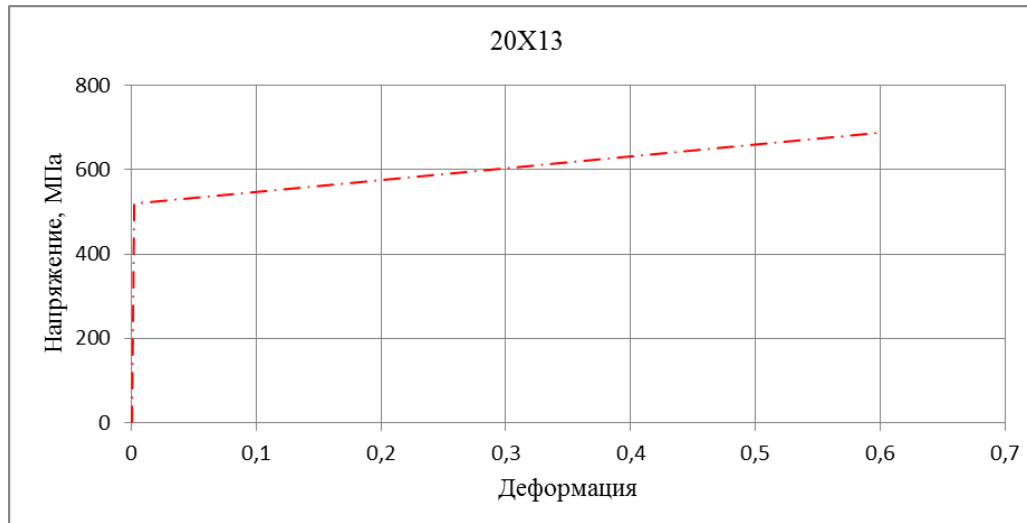


Рис. 2. Модель упругопластического деформирования стали 20X13

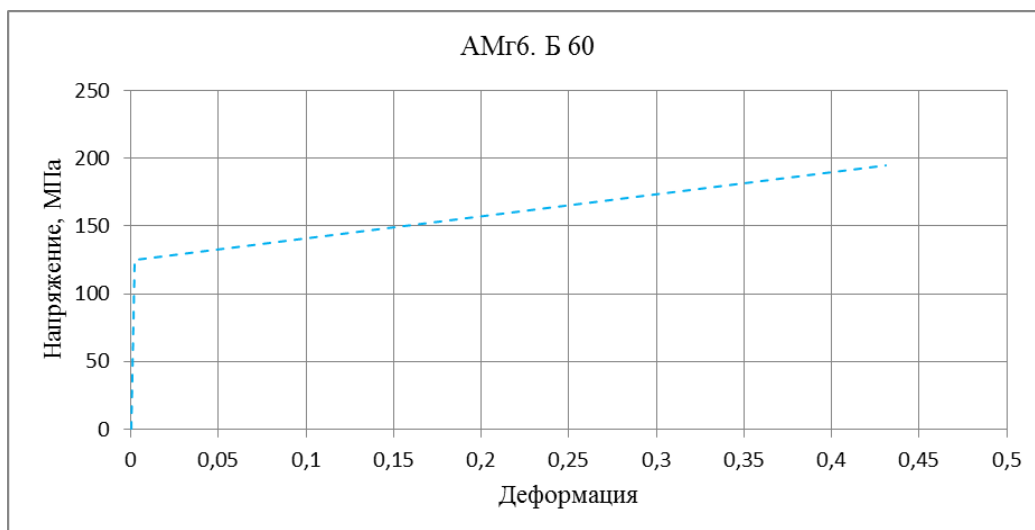


Рис. 3. Модель упругопластического деформирования
алюминиево-магниевого сплава АМг 6.Б 60

2. Методика построения и описание расчетной модели

Разработка расчетной модели для анализа падения ВТУК, осуществлена в соответствии с принципами современной CAD/CAE технологии. Геометрическая 3D-модель ВТУК разработана в среде ANSYS/WORKBENCH. Конечно-элементное (КЭ) разбиение модели выполнено с помощью приложения LS-DYNA ПК ANSYS с использованием трехмерных КЭ SOLID164. Расчетная модель состоит примерно из 750 000 КЭ, и представляет собой подробно смоделированный фрагмент общей конструкции (половину) с присущими ей геометрическими характеристиками, состоящий из различных элементов, взаимодействующих между собой (рис. 4).

Конструктивные элементы, вносящие вклад в общую жесткость конструкции, на основании анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) которых можно будет судить о ее целостности, смоделированы в полном соответствии с реальной геометрией. Элементы конструкции, не влияющие на прочность и жесткость ВТУК, не моделировались, но учтены за счет увеличения плотности материалов соседних элементов с целью сохранения весовых характеристик. Основание, на которое падает ВТУК, смоделировано в виде абсолютно жесткой поверхности, ограниченной по перемещениям во всех направлениях.

Каждая из составляющих данной модели задана как отдельный компонент. Каждому компоненту присвоен персональный материал с характеристиками, отображающими реальные свойства той или иной составляющей.

На основании анализа транспортно-технологического тракта определены возможные варианты падения ВТУК:

- с высоты 9 м под любым углом к плоскости пола;
- с высоты 5,5 м вертикально на фланец.

Таким образом, рассматриваются шесть вариантов падения ВТУК:

- вертикальное падение на дно с высоты $h=9$ м;
- падение на дно под углом с высоты $h=9$ м;
- падение в горизонтальном положении с высоты $h=9$ м;
- падение на крышку под углом с высоты $h=9$ м;
- вертикальное падение на крышку с высоты $h=9$ м;
- вертикальное падение с упором на фланец с высоты $h=5,5$ м.

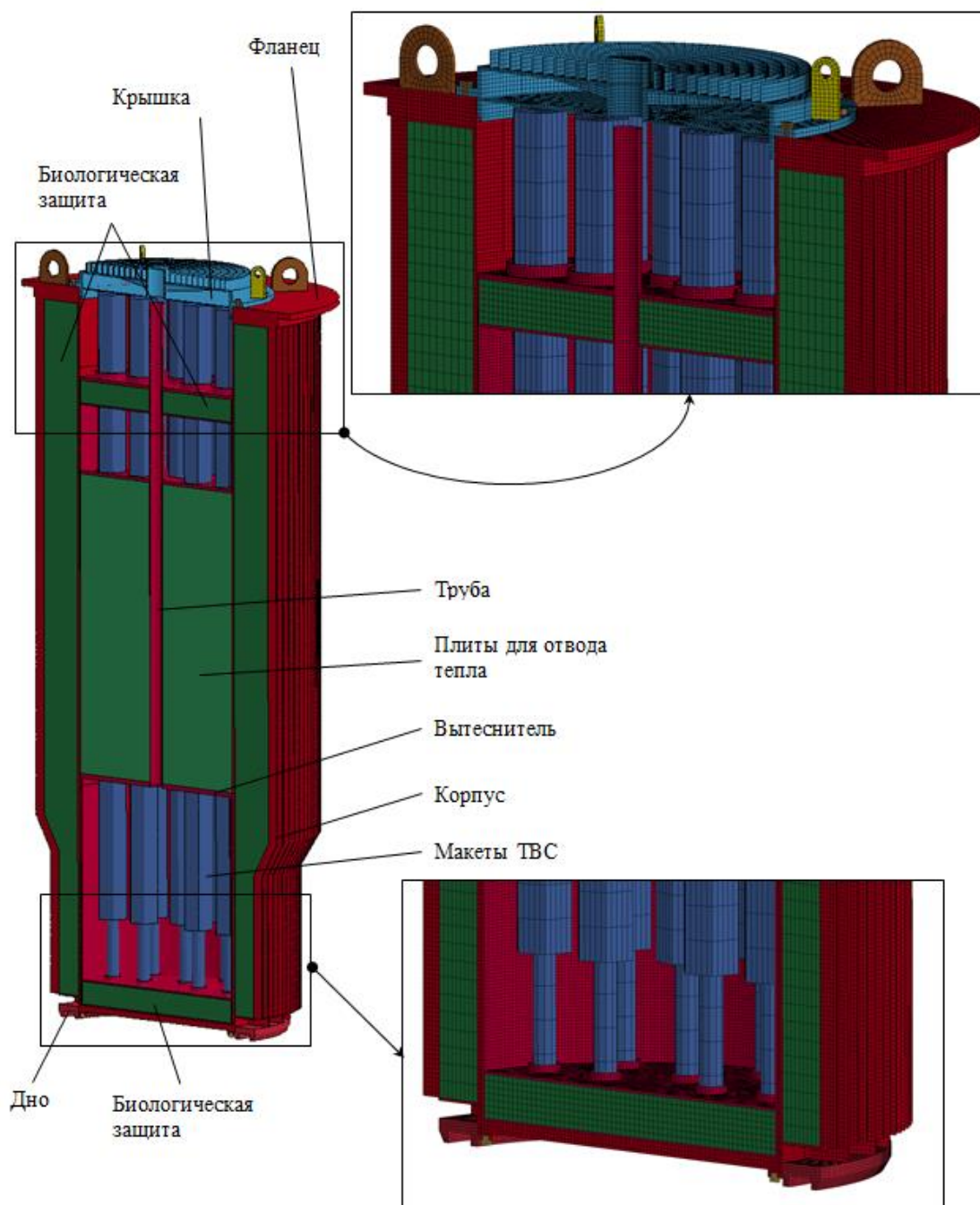


Рис. 4. Расчетная модель ВТУК

Скорость ВТУК в момент соударения с жестким основанием при падении с высоты $h=9$ м

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 9} = 13,3 \text{ м/с}.$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Скорость ВТУК в момент соударения с жестким основанием при падении с высоты $h = 5,5$ м

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 5,5} = 10,4 \text{ м/с}.$$

Углы наклона при падении ВТУК под углом были определены таким образом, чтобы центр масс контейнера находился строго вертикально над точкой контакта контейнера с жестким основанием в самом начале ударного взаимодействия. Данные положения контейнера будут самыми неблагоприятными с точки зрения возникновения максимальных нагрузок в конструктивных элементах, отвечающих за сохранение герметичности ВТУК, в процессе соударения.

Для расчета НДС ВТУК использовалась одна КЭ модель разрабатываемой конструкции с наложением на нее различных параметров исходных событий в виде граничных условий. В качестве параметров исходных событий рассматривалось соударение ВТУК с жестким основанием:

- а) вертикально на дно со скоростью $v_1 = 13,3$ м/с;
- б) под углом к вертикали 20° на дно со скоростью $v_1 = 13,3$ м/с;
- в) горизонтально со скоростью $v_1 = 13,3$ м/с;
- г) под углом к вертикали 25° на крышку со скоростью $v_1 = 13,3$ м/с;
- д) вертикально на крышку со скоростью $v_1 = 13,3$ м/с;
- е) вертикально с упором на фланец со скоростью $v_2 = 10,4$ м/с.

Варианты падения представлены на рис. 5.

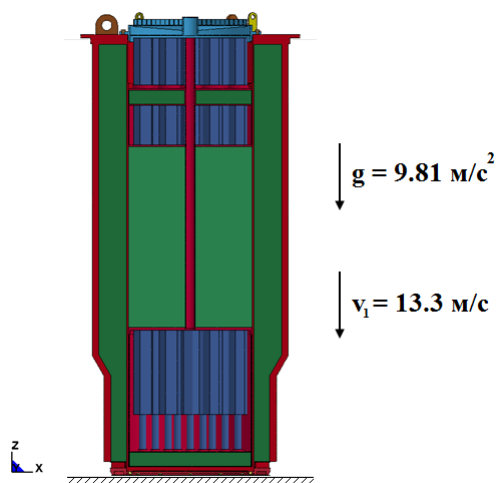
В качестве кинематических граничных условий принята скорость на момент соударения, приложенная к подвижным частям модели, и ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, приложенное ко всем компонентам. Для всех компонентов заданы контактные условия, учитывающие как статический коэффициент трения скольжения сталь по стали (принят $f_{mp}^c = 0,2$), так и динамический коэффициент трения (принят $f_{mp}^d = 0,02$). Тип контакта задан таким образом, что учитывает не только взаимодействие контактных пар, но и формоизменение тела при больших деформациях, когда отдельные области одного тела начинают взаимодействовать между собой. Таким образом, разработанные расчетные модели, наиболее полно отражающие жесткостные и весовые характеристики ВТУК, учитывающие взаимодействие различных элементов в процессе деформирования и дающие возможность провести подробный анализ НДС конструкции при ударном нагружении, позволяют с умеренной долей консерватизма проанализировать последствия падения ВТУК в различных положениях.

3. Расчетный анализ при падении ВТУК

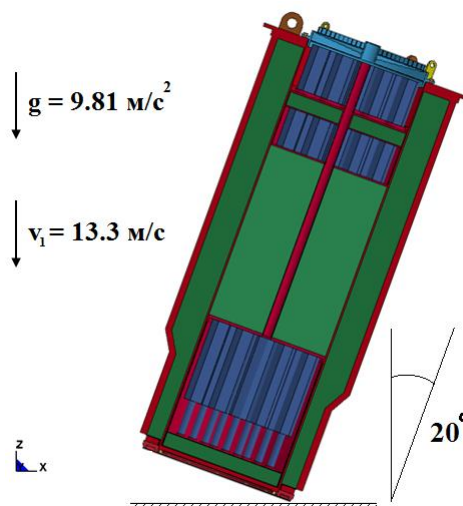
Для всех вариантов процесс падения ВТУК можно условно разделить на три характерных этапа:

- а) первый этап – процесс соударения ВТУК с жестким основанием от момента начала соприкосновения до начала отскока;
- б) второй этап – начало отскока ВТУК с продолжением движения содержимого ВТУК по инерции в направлении приложения начальной скорости;
- в) третий этап – процесс отскока ВТУК от жесткого основания со всем внутренним наполнением.

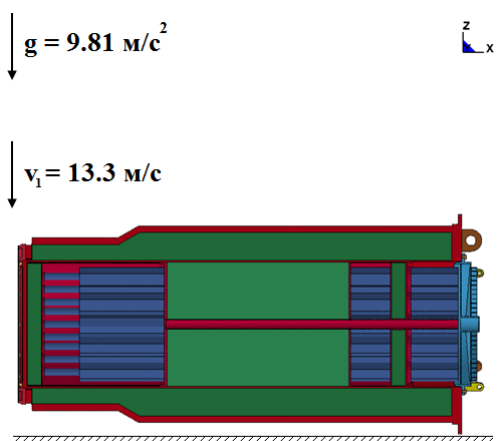
На первом этапе за счет упругопластического деформирования конструкции происходит гашение значительной части кинетической энергии. На данном интервале корпус ВТУК испытывает максимальные ускорения, напряжения и деформации в конструктивных элементах, контактирующих с жестким основанием. Данный этап требует проведения подробного анализа НДС разрабатываемой конструкции, на основании которого можно будет судить о целостности корпуса ВТУК.



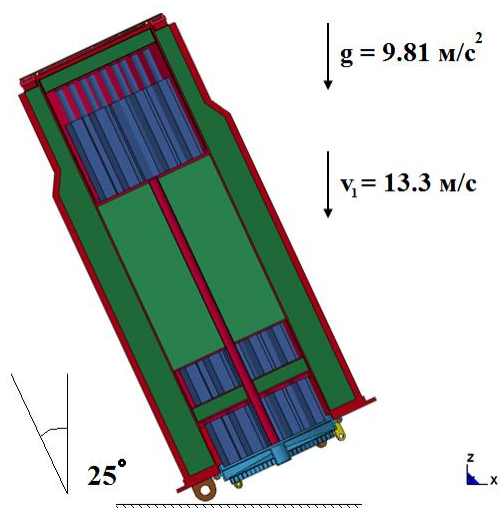
а) вертикально на дно



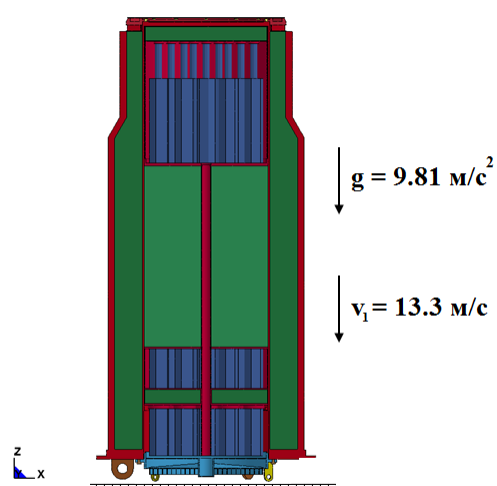
б) под углом на дно



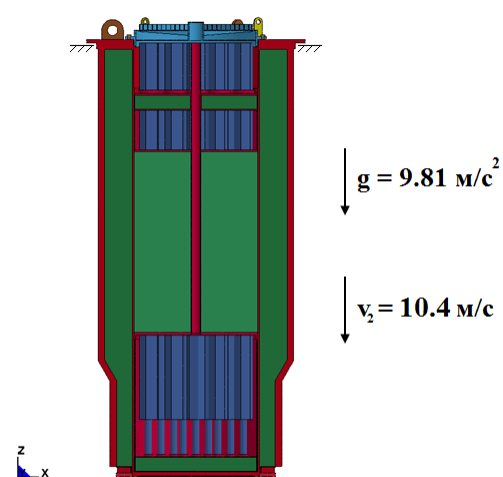
в) горизонтально



г) под углом на крышку



д) вертикально на крышку



е) вертикально на фланец

Рис. 5. Расчетные варианты падения ВТУК на жесткое основание

После соударения ВТУК с жестким основанием, за счет непогашенной части кинетической энергии происходит отскок ВТУК от соударяемой поверхности, а внутреннее наполнение ВТУК продолжает движение по инерции. Второй временной интервал характеризуется возникновением максимальных нагрузок в элементах, контактирующих внутри корпуса ВТУК, из-за движения в противофазе с самим корпусом.

После контактного взаимодействия корпуса ВТУК с его содержимым в процессе соударения, происходит отскок всей конструкции от жесткого основания. Данный этап характеризуется резким снижением упругих напряжений в конструкции ВТУК и завершением накопления пластических деформаций.

Для всех вариантов падения характерен отскок от соударяемой поверхности за счет перехода оставшейся части кинетической энергии в потенциальную энергию упругой деформации.

Поскольку конструкция ВТУК в процессе соударения работает в упругопластической области, в качестве основного параметра оценки состояния всех конструктивных элементов принималась пластическая деформация. При этом за условие целостности элементов при больших деформациях принималось:

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

где ε – интенсивность пластической деформации, полученная в результате расчета, %;

$\varepsilon_{пред}$ – деформация разрушения, %.

Подробный анализ последствий соударений ВТУК с жестким основанием рассмотрен в [7].

В данной статье кратко представлены результаты моделирования падения ВТУК вертикально и под углом на дно.

Деформированное состояние ВТУК в результате падения в вертикальном положении на дно показано на рис. 6.

В результате падения на дно в вертикальном положении корпус ВТУК, выполненный из стали 08X18H10T, испытывает пластические деформации, максимальная величина которых достигает значения, равного величине предельной деформации разрушения $\varepsilon_{пред} = 51\%$, и возникает в ребрах на дне корпуса в месте контакта с жестким основанием. Внутренний корпус, отвечающий за герметичность ВТУК, испытывает пластические деформации, не превышающие 15 %.

Крышка ВТУК, изготовленная из стали 08X18H10T, испытывает пластическую деформацию в центральной части, а также в области расположения элементов крепежа. Максимальная пластическая деформация в крышке не превышает 12 %.

На рис. 7 представлен график изменения кинетической энергии конструкции в процессе соударения при падении в вертикальном положении на дно.

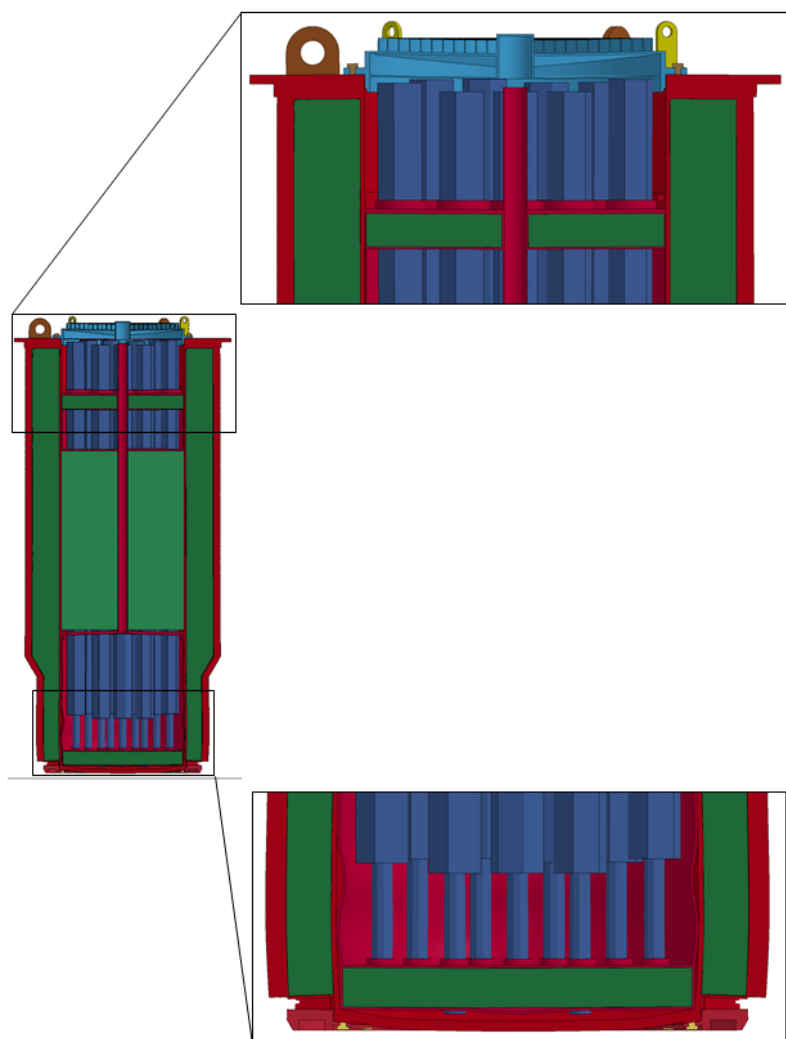


Рис. 6. Деформированное состояние ВТУК в результате падения на жесткое основание вертикально на дно

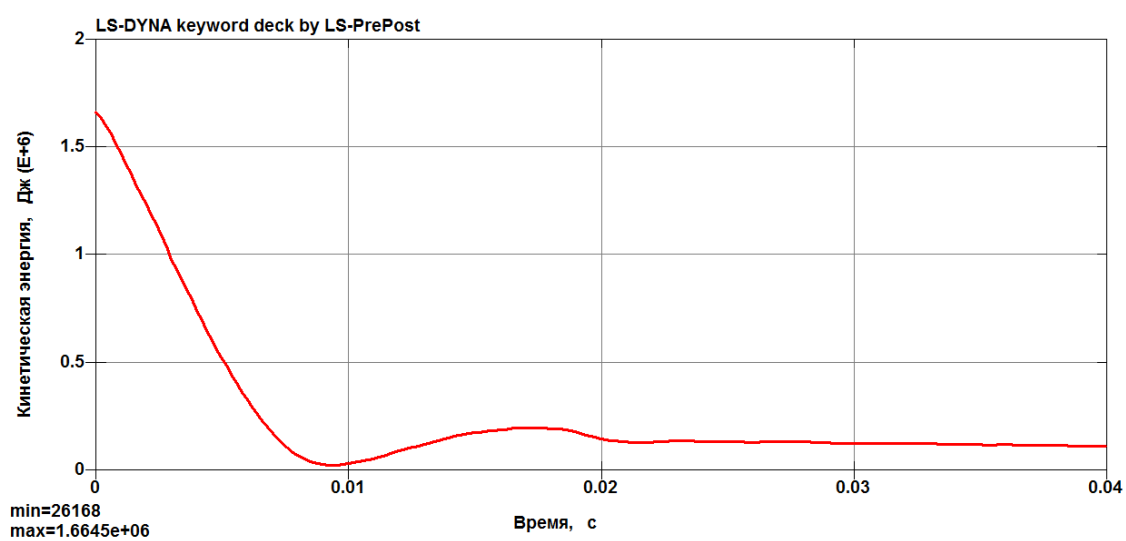


Рис. 7. График изменения кинетической энергии конструкции в процессе соударения для случая падения ВТУК вертикально на дно

Деформированное состояние ВТУК в результате падения под углом на дно показано на рис. 8.

В результате падения под углом на дно корпус ВТУК, выполненный из стали 08X18H10T, испытывает пластические деформации, максимальная величина которых достигает значения, равного величине предельной деформации разрушения $\varepsilon_{пред} = 51\%$, и возникает в ребрах на дне корпуса в месте контакта с жестким основанием. Внутренний корпус, отвечающий за герметичность ВТУК, испытывает пластические деформации, не превышающие 35 %.

Крышка ВТУК, изготовленная из стали 08X18H10T, испытывает пластические деформации, максимальная величина которых достигает значения, равного величине предельной деформации разрушения $\varepsilon_{пред} = 51\%$, и возникает в области расположения элементов крепежа.

На рис. 9 представлен график изменения кинетической энергии конструкции в процессе соударения при падении под углом на дно.

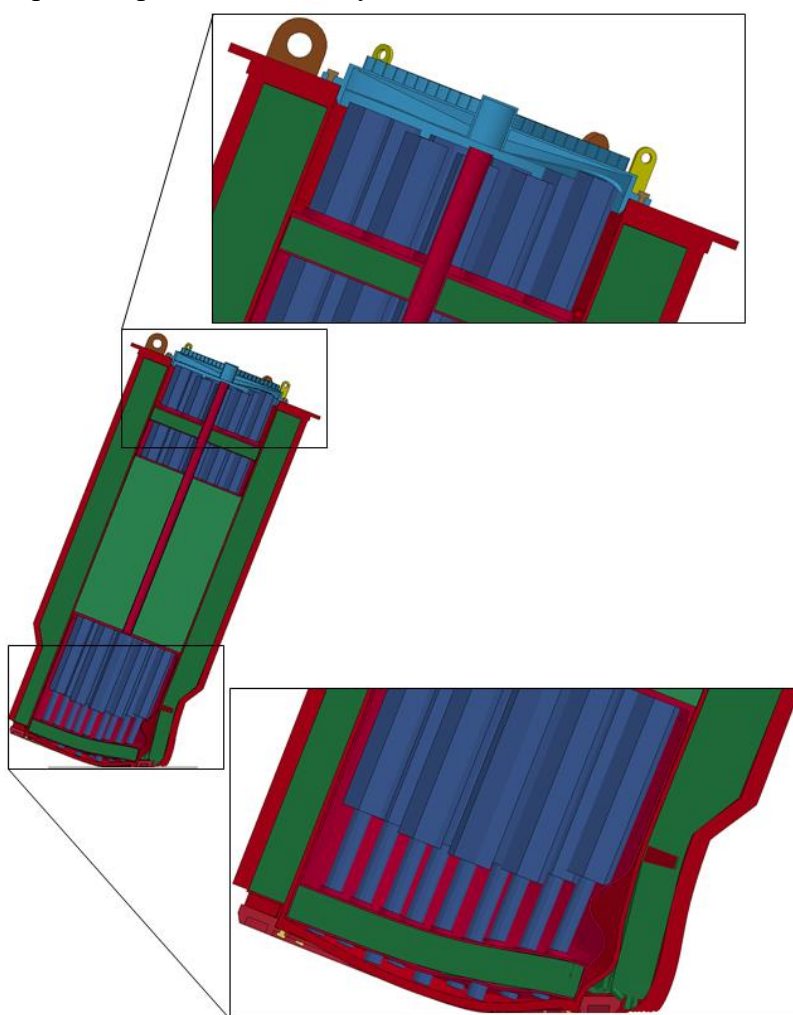


Рис. 8. Деформированное состояние ВТУК в результате падения на жесткое основание под углом на дно

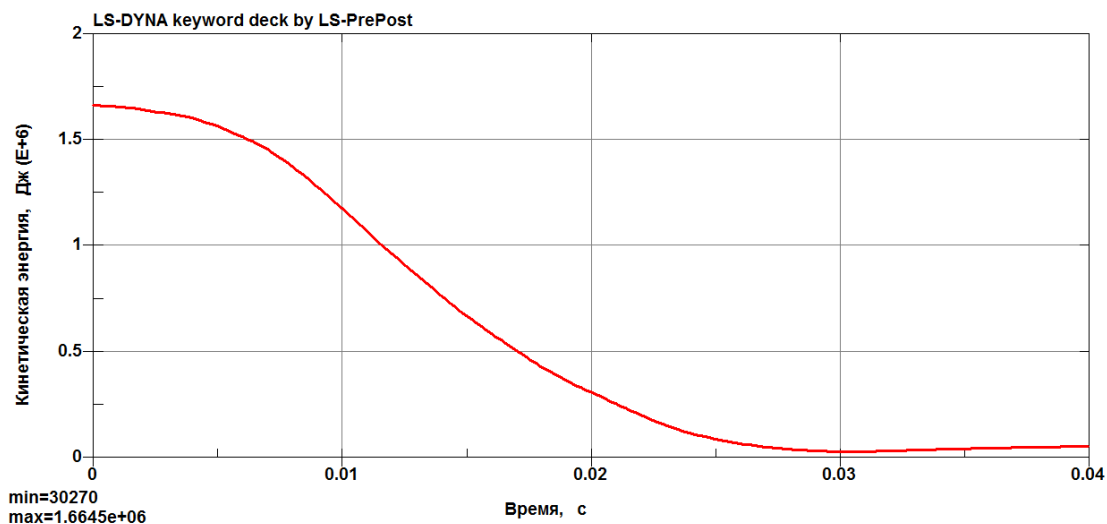


Рис. 9. График изменения кинетической энергии конструкции в процессе соударения для случая падения ВТУК под углом на дно

Для рассмотренных вариантов падения характерны высокие динамические нагрузки в конструктивных элементах, отвечающих за сохранение герметичности ВТУК. Одним из путей снижения динамических нагрузок на оборудование является установка демпфирующих устройств. Для ВТУК предлагается использовать одноразовый демпфер, в котором поглощение энергии удара происходит путем неупругого сопротивления материала деформируемых элементов конструкции демпфера.

4. Применение демпфирующего устройства для ВТУК

Одним из путей снижения динамических нагрузок на оборудование является установка демпфирующих устройств.

Для ВТУК предлагается использовать одноразовый демпфер, в котором поглощение энергии удара происходит путем неупругого сопротивления материала деформируемых элементов конструкции демпфера.

Демпфер представляет собой набор радиально расположенных, предварительно согнутых пластин разной высоты. Такая конфигурация демпфера обеспечивает переменную жесткость в зависимости от степени деформированности.

Деформированное состояние ВТУК в результате падения в вертикальном положении на дно при использовании демпфирующего элемента показано на рис. 10.

В результате падения на дно в вертикальном положении корпус ВТУК испытывает пластические деформации, не превышающие 2,3% (рис. 11). А внутренний корпус, отвечающий за герметичность ВТУК, испытывает пластические деформации величиной около 2%. Максимальная пластическая деформация в крышке не превышает 2,5% (рис. 12).

На рис. 13 представлен график изменения кинетической энергии конструкции в процессе соударения при падении на дно в вертикальном положении.

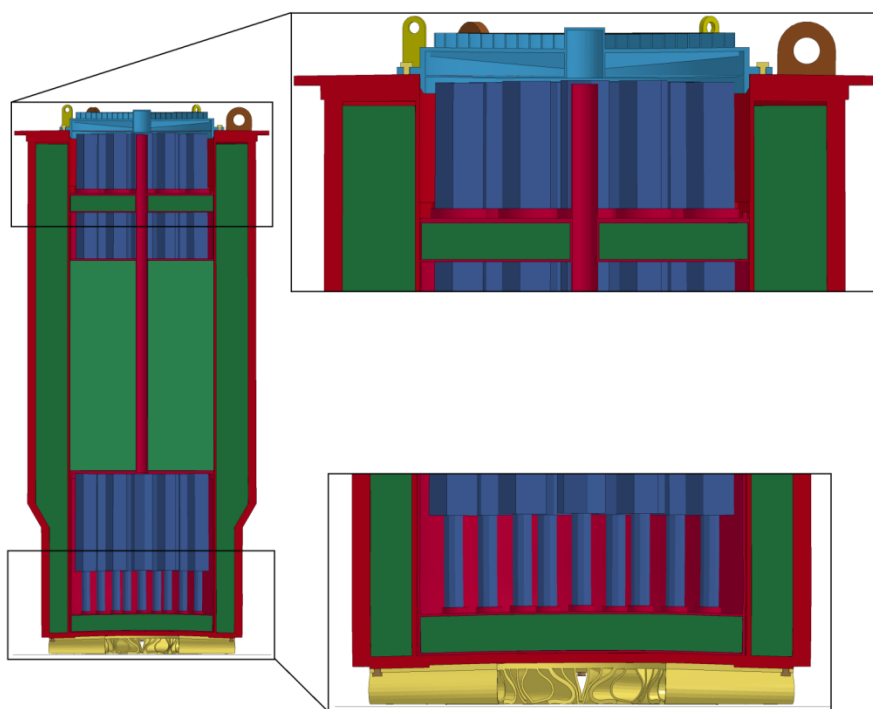


Рис. 10. Деформированное состояние ВТУК в результате падения на жесткое основание вертикально на дно

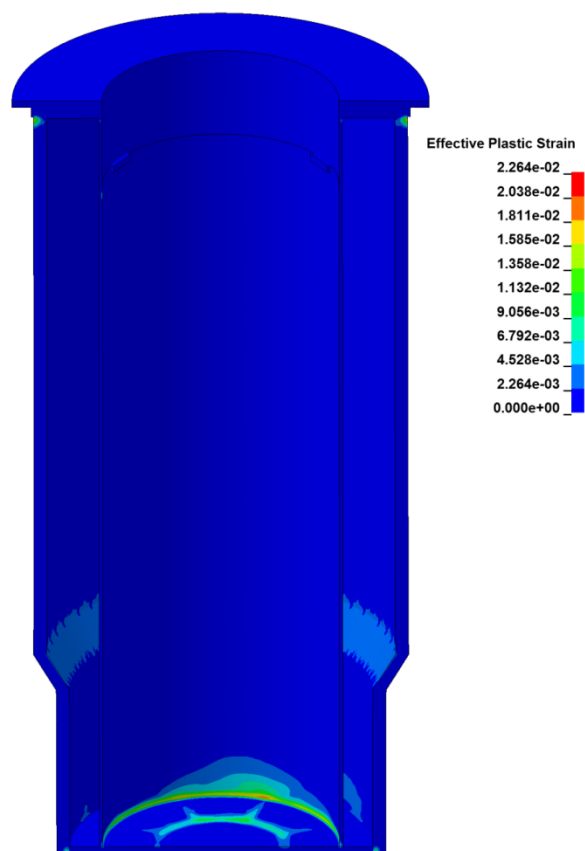


Рис. 11. Распределение интенсивности пластических деформаций в корпусе после соударения ВТУК о жесткое основание в результате падения вертикально на дно

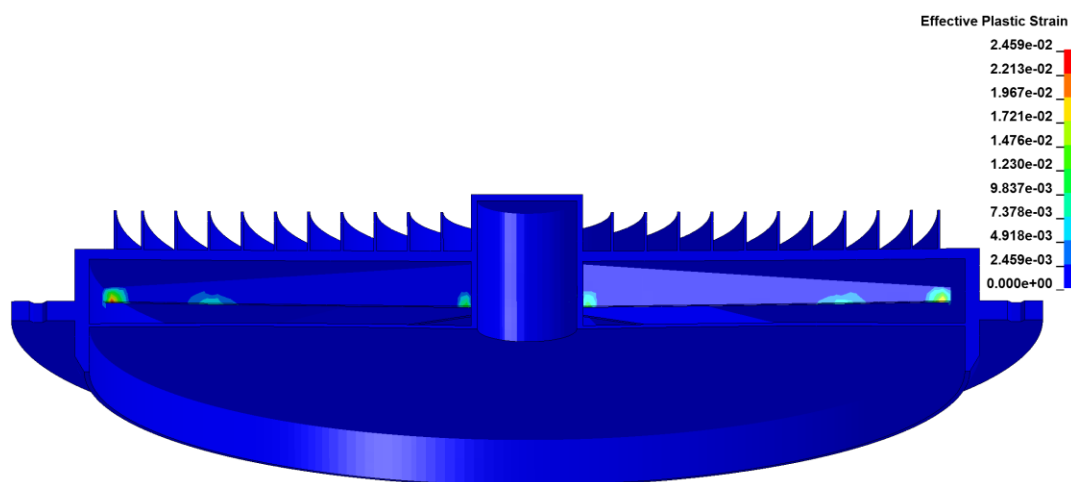


Рис. 12. Распределение интенсивности пластических деформаций в крышке после соударения ВТУК о жесткое основание в результате падения вертикально на дно

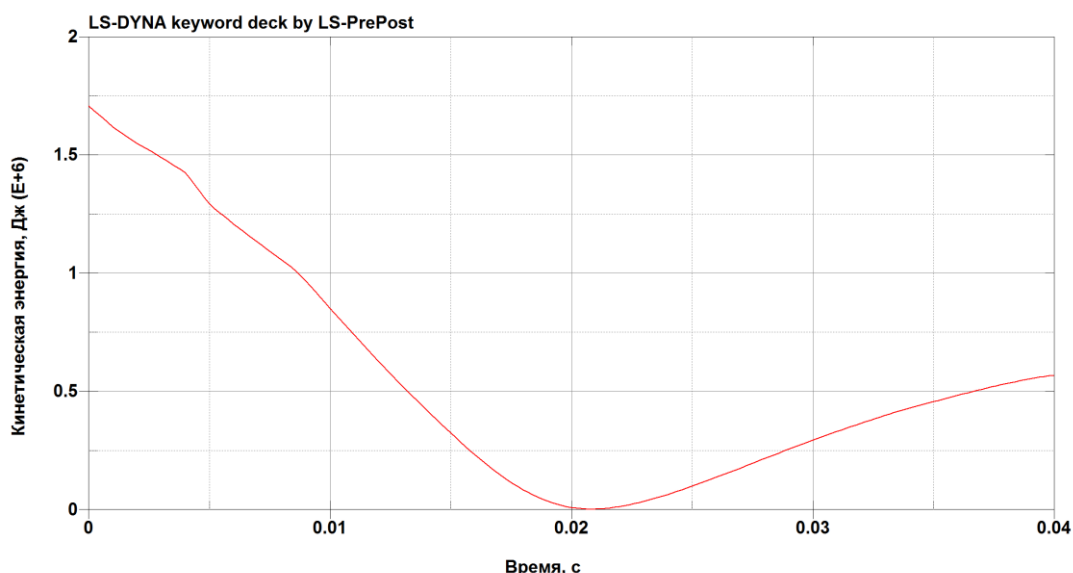


Рис. 13. График изменения кинетической энергии конструкции в процессе соударения для случая падения ВТУК вертикально на дно

Из рис. 13 видно, что в процессе соударения на временном интервале от 0 с до 0,02 с, происходит относительно плавное гашение значительной части кинетической энергии падающего ВТУК за счет пластического деформирования ребер демпфирующего элемента.

Деформированное состояние ВТУК в результате падения под углом на дно при использовании демпфирующего элемента показано на рис. 14.

В результате падения под углом на дно корпус ВТУК испытывает пластические деформации величиной около 25 % (рис. 15). Внутренний корпус, отвечающий за герметичность ВТУК, испытывает пластические деформации, достигающие 13,5 %.

Крышка ВТУК испытывает пластические деформации, максимальная величина которых не превышает 28 %, и возникает в месте контакта внутреннего листа крышки с ТВС, находящимися во ВТУК со стороны удара. Данное контактное взаимодействие осуществляется в процессе реализации отскока ТВС от дна ВТУК при соударении с жестким основанием (рис. 16).

На рис. 17 представлен график изменения кинетической энергии конструкции в процессе соударения при падении под углом на дно.

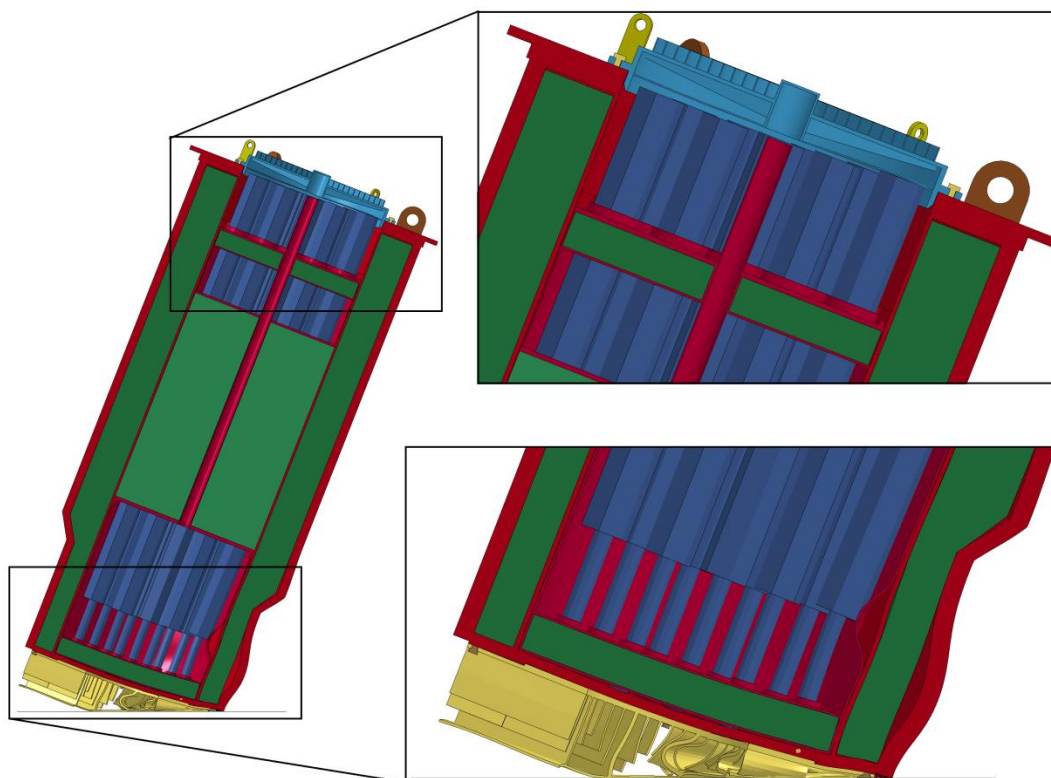


Рис. 14. Деформированное состояние ВТУК в результате падения на жесткое основание под углом на дно

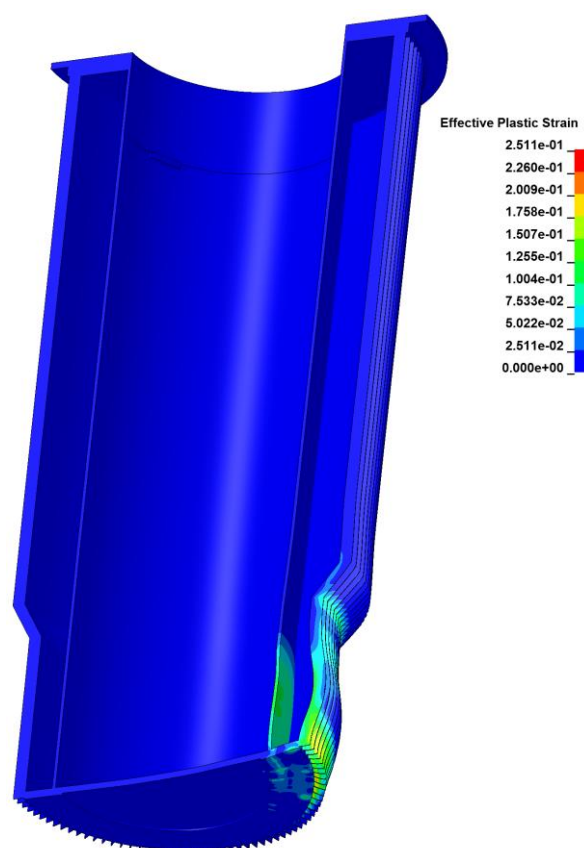


Рис. 15. Распределение интенсивности пластических деформаций в корпусе после соударения ВТУК о жесткое основание в результате падения под углом на дно

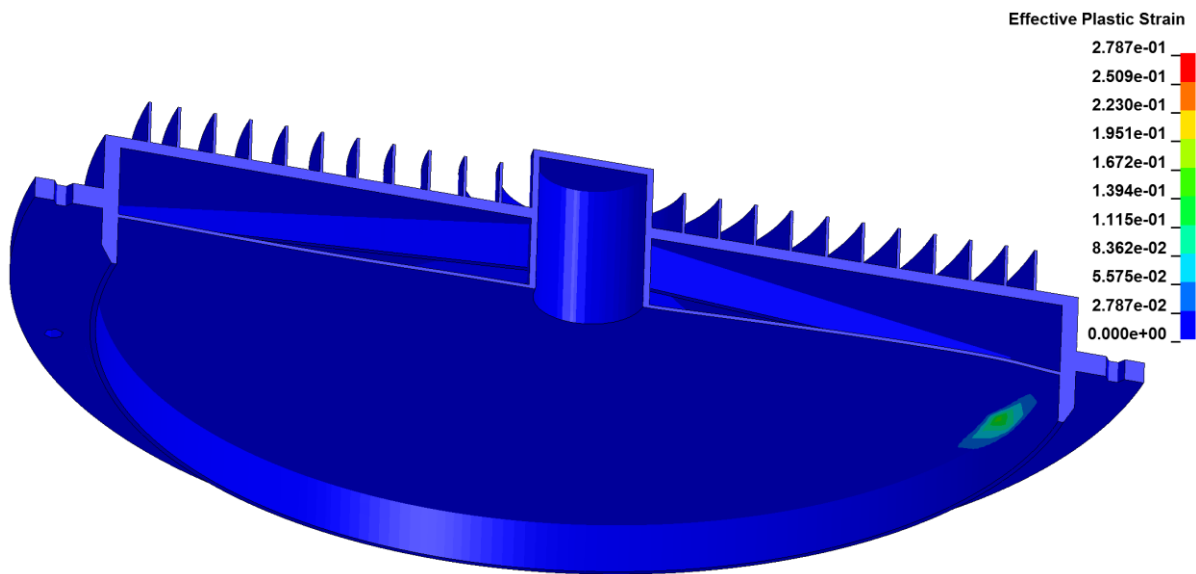


Рис. 16. Распределение интенсивности пластических деформаций в крышке после соударения ВТУК о жесткое основание в результате падения под углом на дно

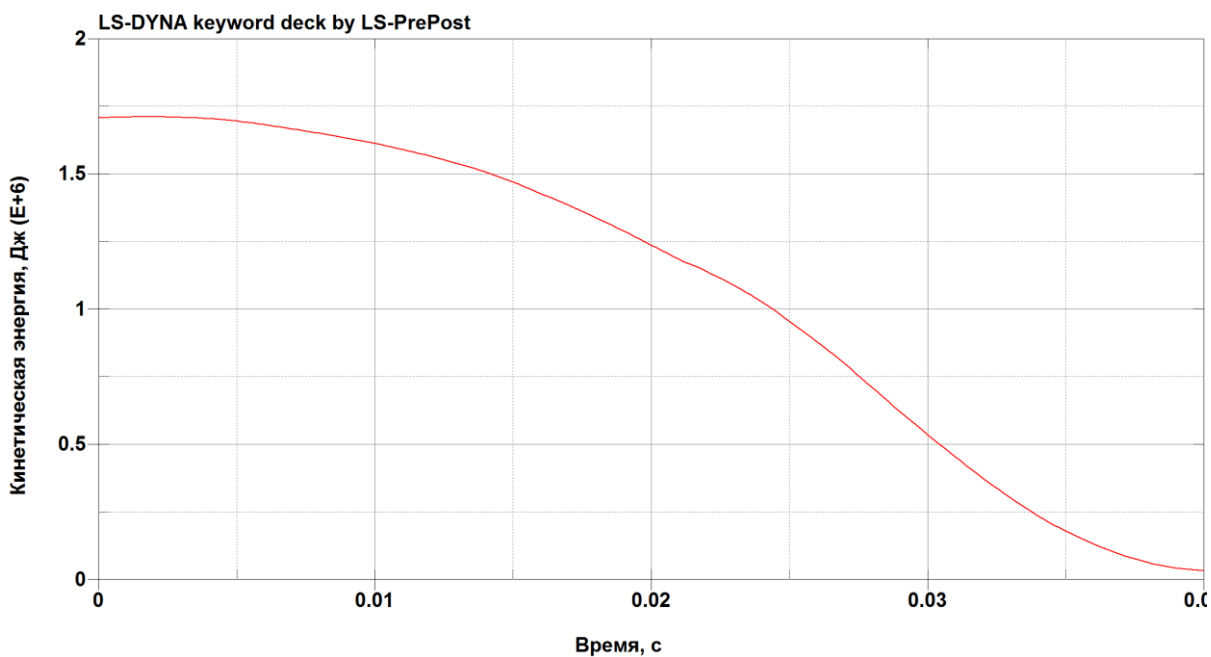


Рис. 17. График изменения кинетической энергии конструкции в процессе соударения для случая падения ВТУК под углом на дно

Из рис. 17 видно, что в процессе соударения на временном интервале от 0 с до 0,04 с, происходит плавное гашение кинетической энергии падающего ВТУК за счет пластического деформирования ребер демпфирующего элемента.

5. Анализ работоспособности демпфирующего устройства

Сравнение величин максимальных пластических деформаций в элементах ВТУК, отвечающих за герметичность, представлено в таблице 2.

Таблица 2

Деформации в элементах конструкции

Вариант падения	Конструктивный элемент	Относительная пластическая деформация, %	
		Без демпфирующего элемента	С использованием демпфирующего элемента
Вертикально на дно	Корпус ВТУК	51	2,3
	Внутренний корпус ВТУК	15	2,0
	Крышка ВТУК	12	2,5
Под углом на дно	Корпус ВТУК	51	25,0
	Внутренний корпус ВТУК	35	13,5
	Крышка ВТУК	51	28,0

Проведенный сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния показал значительное снижение пластических деформаций в элементах ВТУК, отвечающих за герметичность. При этом за счет применения демпфирующего элемента деформации в элементах ВТУК не достигают величины деформации разрушения $\varepsilon_{пред} = 51\%$.

Таким образом, показана эффективность применения демпфера для снижения динамических нагрузок на ВТУК.

Заключение

Выполнен расчетный анализ проектной аварии, связанной с падением ВТУК при транспортно-технологических операциях, и ее последствий. Анализ выполнен с использованием модуля динамических расчетов ANSYS/LS-DYNA.

На основании выполненного расчетного анализа напряженно-деформированного состояния ВТУК сделан вывод о необходимости применения демпфирующих устройств для снижения динамических нагрузок при аварийных ситуациях, связанных с падением во время проведения транспортно-технологических операций. Показано значительное смягчение удара при использовании предложенного демпфера.

Применение демпфера в проектируемой конструкции при падении в вертикальном положении и под углом на дно на жесткое основание с высоты 9 м является весьма эффективным. Способность демпфера менять свою жесткость в процессе деформирования позволяет максимально снизить последствия удара.

Таким образом, проведенное математическое исследование динамической прочности ВТУК на этапе проектирования позволило сформулировать рекомендации по устранению выявленных недостатков конструкции. Это позволяет снизить количество натурных испытаний и способствует повышению конкурентоспособности изделия за счет снижения себестоимости.

Список литературы

1. Применение расчетного комплекса ANSYS\LS-DYNA в анализе аварий, связанных с падением оборудования ЯЭУ, Тимофеев А.В., Кайдалов В.Б., Лапшин Д.А., Малыгин М.Г.. XIV Нижегородская сессия молодых ученых «Технические науки»,

- 15–19 февраля 2009г. Сборник тезисов докладов. г. Н.Новгород, Нижегородский НИЦ, 2009, стр.86.
2. *Баженов В.Г., Кибец А.И., Кибец Ю.И., Лаптев П.В., Рябов А.А., Романов В.И., Сотсков Г.И.* Конечно-элементный анализ высокоскоростного удара о преграду транспортного упаковочного комплекта. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004 г. № 2, С.118–125.
 3. *Кибец А.И., Кибец Ю.И., Матвеев В.З.* Численное моделирование динамического деформирования контейнера при аварийном падении на него плиты. Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов. Межвуз. сб. Москва. Товарищество научных изданий КМК, 1997. С.77–83.
 4. *Рябов А.А., Романов В.И., Сотсков Г.И., Скурихин С.Г., Барченков А.И., Моренко А.И.* Компьютерное моделирование поведения системы демпфирования защитного контейнера при его падениях. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Механика. 2000. № 2. С. 98–102.
 5. Программный комплекс ANSYS Users Intoduction.
 6. А. Надаи. Пластичность и разрушение твердых тел. М, Издательство иностранной литературы, 1954.
 7. *Виленский О.Ю., Душев С. А., Лапшин Д.А., Новинский Э.Г., Русинов Н.С.* Оценка последствий падения ВТУК при проведении транспортно-технологических операций. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2021 г. № 3. С. 88–105.