

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039.53

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_49

О.Ю. Виленский¹, С.А. Душев¹, Д.А. Лапшин¹, Э.Г. Новинский¹, В.А. Пахомов¹,
А.М. Татарский¹, М.А. Легчанов²

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ В АТОМНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

¹Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты расчетно-экспериментального исследования динамических характеристик одного из распространенных в атомном машиностроении конструкционного материала – стали 08X18H10T. Проведена идентификация математической модели поведения данного материала при ударных воздействиях высокой интенсивности; выполнена верификация этой модели путем сравнения с результатами экспериментов. Рассмотрены транспортно-технологические операции, при проведении которых наиболее вероятны случаи падения перемещаемого крупногабаритного ответственного оборудования. В качестве критерия сохранения целостности оборудования взята деформация, приводящая к разрушению при стендовых испытаниях на растяжение стандартного образца и определяемая по относительному поперечному сужению сечения в месте разрыва. Для расчетов использовался аттестованный программный комплекс ANSYS/LS-DYNA, в основу динамических расчетов которого заложен метод конечных элементов. Обоснована актуальность и экономическая целесообразность проведения данных расчетов оборудования для ядерных установок в случае аварийного падения.

Ключевые слова: математическая модель деформирования, конструкционный материал, экспериментальное исследование, падение перемещаемого оборудования, динамические характеристики, надежность, безопасность ЯЭУ.

Введение

Создателями ядерных энергетических установок (ЯЭУ) и атомных электростанций (АЭС) особое внимание уделяется разработке эффективных и радиационно безопасных технологий обращения со свежим и отработавшим ядерным топливом. К данной сфере относится разработка не только надежного, но и конкурентоспособного оборудования для хранения и транспортировки топлива. Очевидно, что аварийная ситуация в результате падения и разрушения такого оборудования во время транспортно-технологических работ (ТТР) приведет к серьезным радиационным последствиям для обслуживающего персонала и окружающей среды. Поэтому требование обоснования безопасности при проектировании такого оборудования и обслуживающих систем закладывается изначально в нормативную документацию на проект. Следует отметить, что конструкция транспортно-технологического оборудования относится к изделиям повышенной сложности и должна удовлетворять требованиям динамической прочности при воздействии ударных нагрузок повышенной интенсивности. При этом она должна обладать демпфирующими свойствами, позволяющими амортизировать внешние ударные нагрузки, снижая их воздействие на внутреннюю «начинку». Таким образом, расчетный анализ позволяет оценить степень механического разрушения оборудования и его разгерметизации в этих условиях.

Для выполнения подобного анализа применяют специализированные программные продукты (ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS, AUTODYN и т.д.), позволяющие решать уравнения механики сплошной среды для определения напряженно-деформированного состояния узлов и элементов конструкций в условиях интенсивного динамического нагружения. От качества математических моделей, описывающих воздействие параметров нагружения в процессе соударений на степень деформирования конструкционных материалов, зависит степень достоверности получаемых результатов численного моделирования. В анализе процесса ударного нагружения должны быть учтены такие факторы, как влияние скорости деформации на радиус поверхности текучести, значительный адиабатический разогрев материала в области локальных пластических деформаций и снижения значений его механических характеристик.

В настоящей работе использована широко применяемая в атомной отрасли коррозионноустойчивая сталь аустенитного класса 08X18H10T для идентификации и верификации модели деформирования. Диаграммы деформирования и граничные характеристики разрушения получены на стандартных образцах этой стали, испытанных на сжатие и растяжение в диапазоне скоростей деформаций от $0,001 \text{ с}^{-1}$ до 1500 с^{-1} и при температурах от 20 до $350 \text{ }^\circ\text{C}$.

При высокоскоростном нагружении с целью определения механических свойств сталей применен метод Кольского с несколькими вариантами разрезного стержня Гопкинсона. Диаграммы деформирования, полученные для различных режимов нагружения, позволили определить пределы прочности материала и их зависимость от скоростей деформаций и температуры. Для оценки изменения прочности в широком диапазоне скоростей деформации материала результаты динамических экспериментов сравнены с результатами аналогичных статических испытаний. В проведенных экспериментах определены параметры модели пластичности Jonson-Cook из библиотеки LS-DYNA (1), учитывающей влияние скорости деформации и температуры на радиус поверхности текучести. С использованием специальных тестовых экспериментов проведена верификация математических моделей.

Методы экспериментального исследования. Характеристики стали 08X18H10T при динамическом нагружении в настоящей работе определяли методом Кольского по схеме Николаса [1-4]. Деформирование материала при повышенных температурах исследовалось с использованием миниатюрной печи трубчатой конструкции, которая надевается на торцы мерных стержней с расположенным между ними образцом. К боковой поверхности образца приварена ХК-термопара для контроля его температуры. Программой испытаний предусматривалось дважды проведение каждого режима нагружения (скорость, деформация, температура). Средняя кривая с характеристиками разброса экспериментальных данных (доверительные интервалы) для каждого режима определялась из полученных диаграмм. В работе А.М. Брагова [5] показано, что погрешность определения напряжения с использованием метода Кольского не превышает 7 %, а деформации образца – не превышает 6 %.

Результаты экспериментальных исследований. Проведенные испытания показали, что материал имеет:

- положительную чувствительность предела текучести к росту скорости деформации (динамическая диаграмма деформирования ($\sim 1000 \text{ с}^{-1}$) оказалась на 8 % выше статической кривой);
- отрицательную чувствительность к повышению температуры (разогрев образцов до $350 \text{ }^\circ\text{C}$ снизил предел текучести на 20 %);
- предельные значения характеристик пластичности, практически не зависящие от скорости деформации и температуры и составляющие относительное удлинение $\delta \approx 50 \%$ и относительное сужение $\psi \approx 70 \%$.

Идентификация математических моделей. Приведенные исследования деформирования стали 08X18H10T при статическом и динамическом нагружениях позволили параметризовать модель Jonson-Cook из библиотеки LS-DYNA. Модель Jonson-Cook относит напряжение текучести к функциям деформации, скорости деформации, температуры и представляется в следующем виде [6] (1):

$$\sigma_{JC} = (A + B \cdot \varepsilon_p^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*) \cdot (1 - T^{*m}), \quad (1)$$

где $A + B \cdot \varepsilon_p^n$ – статическая составляющая; $1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*$ – динамическая составляющая; $1 - T^{*m}$ – температурная составляющая; A, B, C, n, m – постоянные материала; ε_p – эффективная пластическая деформация; $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ – безразмерная пластическая скорость деформации ($\dot{\varepsilon}_0 = 1 \frac{1}{c}$); $T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$ – модифицированная гомологическая температура; $T_0 = 293$ К и $T_m = 1723$ К – соответственно температура окружающей среды и температура плавления материала. Адиабатический разогрев материала за счет пластической деформации рассчитывается по формуле (2):

$$\Delta T = \frac{0,9 \cdot W_p}{\rho \cdot c_p}, \quad (2)$$

где W_p – работа пластической деформации, ρ – плотность материала, c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

В модели Jonson-Cook деформации множителя $(1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*)$ носят линейный характер по логарифму скорости. Для чистоты эксперимента рассматривались и другие математические модели учета влияния скорости деформации на напряжение течения. Полный перечень исследованных моделей приведен ниже.

- $1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*$ – модель 1 – Jonson-Cook [6];
- $1 + C \cdot \ln(\dot{\varepsilon}^*) + C_2 \cdot \ln(\dot{\varepsilon}^*)^2$ – модель 2 – Huh & Kang [7];
- $(\dot{\varepsilon}^*)^C$ – модель 3 – Allen, Rule & Jones [8];
- $1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}^*}{C}\right)^{\frac{1}{p}}$ – модель 4 – Cowper-Symonds [9].

На рис. 1. показан общий вид модели Jonson-Cook.

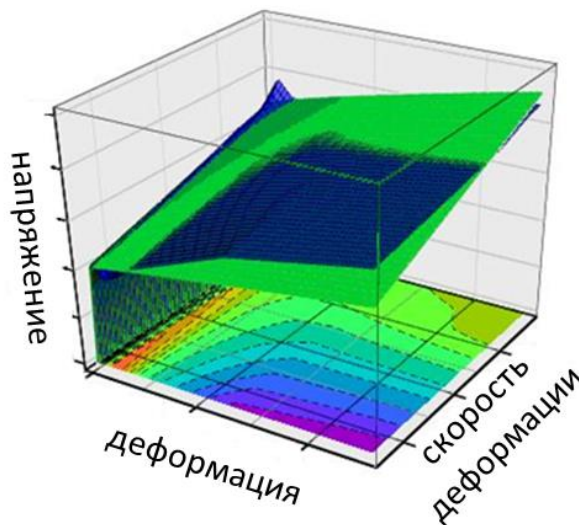


Рис. 1. Иллюстрация аппроксимации экспериментальной поверхности текучести аналитической функцией

В табл. 1. указаны характеристики стали, которые необходимо задать в модели.

Таблица 1

Физико-механические характеристики стали

Характеристика	Значение	Размерность
Плотность, ρ	7850	кг/м ³
Модуль Юнга, E	200	ГПа
Коэффициент Пуассона, ν	0,28	
Модуль сдвига, G	78	ГПа
Удельная теплоемкость, C_p	462	Дж/кг/К

Для разных моделей динамической составляющей в процессе решения оптимизационной задачи получены параметры модели Jonson-Cook (A, B, n, C, C_2, p, m).

Для принятой для исследования стали 08Х18Н10Т дает наименьшую погрешность (минимальное отклонение математической кривой от экспериментальных диаграмм деформирования) модель 4 – Cowper-Symonds. Сравнение кривых деформирования, рассчитанных в соответствии с моделью (сплошная линия), с экспериментальными диаграммами деформирования (маркеры), полученными при разных условиях нагружения показано на рис. 2, где ось X – относительная пластическая деформация, ось Y – напряжение в МПа.

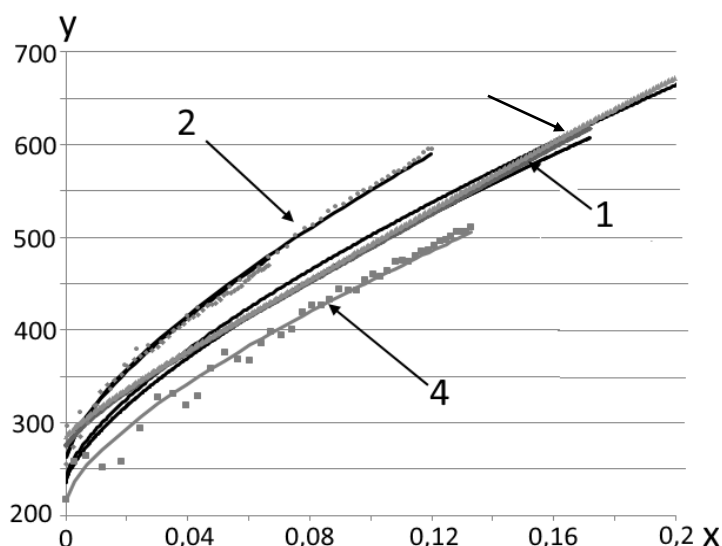


Рис. 2. Сравнение экспериментальных диаграмм деформирования (напряжение течения в МПа от пластической деформации) с кривыми, построенными по модели Cowper-Symonds

1 – статика, 2 – динамика, 20 °С, 3 – динамика, 150 °С, 4 – динамика 350 °С

Верификация модели деформирования стали. Для идентификации математических моделей используются данные «простых» (базовых) экспериментов (однородное и одноосное напряженное состояние, постоянная скорость деформации и температура), а значит, требуется проверка работоспособности определяющих соотношений в реальных условиях работы узлов конструкций. В связи со сложной геометрией подобных элементов, а также благодаря разнообразию распределений и истории изменений нагрузок, напряженное и деформированное состояние в них не является однородным и одноосным, а скорость деформации может сильно изменяться в процессе нагружения. Для проверки адекватности модели используются специальные тестовые эксперименты, которые, с одной стороны, достаточно просты и допускают однозначную трактовку результатов и численное воспроизведение без упрощений, а с другой – напряженное состояние в этих видах испытаний. Также история изменения параметров нагружения отличается от таковой в базовых экспериментах.

Для верификации модели деформирования стали 08X18H10T использовались эксперименты на высокоскоростное внедрение инденторов со сферической и конической головными частями в образцы из исследуемого материала [10, 11] и на диагональное сжатие. В первом верификационном эксперименте индентор с образцом размещались в системе разрезного стержня и нагружались аналогично традиционной схеме летящим с некоторой скоростью ударником. В ходе эксперимента регистрировались деформации в сечениях нагружающего и опорного стержней, а также проводились измерения характерных размеров пластического отпечатка в образце. Во втором верификационном эксперименте (динамическом диагональном сжатии) используется цилиндрический образец в виде таблетки, повернутой на 90^0 таким образом, что его нагружение осуществляется по диагонали (по диаметральной плоскости). Схема нагружения образца аналогична схеме испытания на раскалывание [12]. Как и в предыдущем случае тензодатчики на мерных стержнях позволяют проводить регистрацию импульсов деформаций. Информация, наряду с остаточной формой образца, используется для верификации моделей упруго-пластического поведения материалов.

Нагружение образцов проводилось в системе разрезного стержня диаметром 20 мм, выполненного из высокопрочной стали. Стальной ударник диаметром 20 мм и длиной 300 мм в случае внедрения конического индентора разгонялся до скорости 18,3 м/с, а в случае использования сферического индентора и в схеме диагонального сжатия – до скорости 22,4 м/с. При моделировании экспериментов на высокоскоростное внедрение между индентором и образцом задавался контакт с трением (коэффициент трения равен 0,1). Расчет проводился в плоской осесимметричной постановке для схем индентирования, и трехмерной постановке – для диагонального сжатия.

Результаты сравнения отпечатков инденторов и сравнение форм образцов таблеток, полученных в натурном и численном экспериментах, приводятся на рис. 3. Относительная погрешность расчетного предсказания диаметра отпечатка в случае использования конического индентора составила 2,0 %, для сферического индентора 0,4 %, в случае с диагональным сжатием образцов, относительная погрешность не превысила 9,7 %.

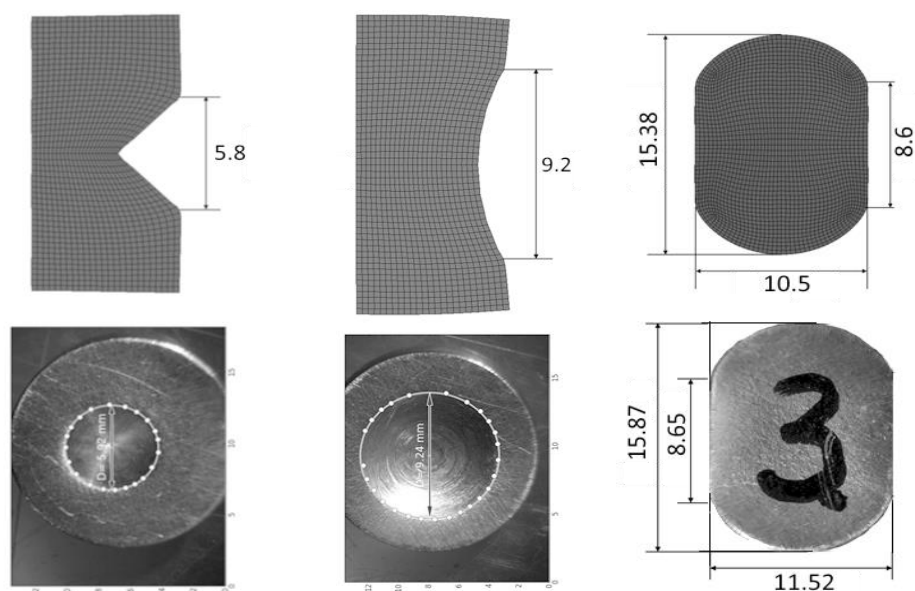


Рис. 3. Сравнение пластических отпечатков, полученных в вычислительном (сверху) и натурном (снизу) экспериментах (все размеры в мм)

Заключение по исследованиям материала. По результатам серии статических и динамических экспериментов при различных температурах для исследованного материала идентифицирована математическая модель из библиотеки программного комплекса LS-DYNA.

Полученная математическая модель верифицирована с использованием тестовых испытаний на высокоскоростное внедрение конического и сферического инденторов, а также эксперимента на динамическое диагональное сжатие образца в системе разрезного стержня. Результаты сравнения данных натуральных и вычислительных экспериментов позволяют сделать вывод о достоверности и точности математической модели. Таким образом, совокупность полученных экспериментальных данных, идентифицированной и верифицированной математической модели (определяющих соотношений) теории течений свидетельствует о применимости данной модели для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности исследуемых конструкций, изготовленных из исследуемого материала в условиях динамических нагрузений.

Моделирование разрабатываемых конструкций. В АО «ОКБМ Африкантов» разработан целый ряд конструкций, которые должны отвечать всем требованиям нормативных документов по обеспечению безопасности объектов использования атомной энергии. В соответствии с требованиями НП-061-05 («Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на ОИАЭ») разрабатываемые конструкции должны быть способны выполнять свои функции в установленном проектом объеме с учетом всех внутренних и внешних воздействий природного и техногенного происхождения. В перечень воздействий должны входить все нагрузки при нормальной эксплуатации (НЭ), нарушении нормальной эксплуатации (ННЭ) и проектной аварии (ПА). В этом плане, отдельно выделяется группа режимов, в которой анализируются последствия ситуаций, связанных с падением оборудования с радиоактивными материалами в процессе ТТО.

В соответствии с НП-018-05 («Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности атомных станций с реакторами на быстрых нейтронах»), в перечень исходных событий ННЭ входят:

- падение тепловыделяющей сборки (ТВС) в реактор при перегрузке;
- падение тяжелых предметов на реактор.

Оценка прочности оборудования выполнена в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-002-86 (Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок). Прочность конструкции оценивается по категориям напряжений, регламентированным для расчетного случая, к которому отнесена та или иная ситуация ННЭ или ПА. Допускаемые напряжения принимаются с коэффициентами запаса соответствующими расчетному случаю. Допускается возникновение пластических деформаций в локальных зонах, зонах концентрации напряжений, не препятствующих нормальной эксплуатации и не приводящих к переходу конструкции в предельное состояние, при котором ее дальнейшая эксплуатация по назначению недопустима или нецелесообразна, либо восстановление ее работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Вопрос о допустимости локальных пластических деформаций для каждой конкретной конструкции решается индивидуально.

Актуальность разработки расчетных моделей и оснащения этих моделей необходимыми параметрами и характеристиками вызвана необходимостью проведения всестороннего анализа НДС разрабатываемых конструкций на стадии проектирования и сложностью проведения представительных полномасштабных испытаний.

Ряд конструкций с результатами расчетных исследований показаны на рис. 4-14.

Рассмотрены такие задачи как: падение строительных конструкций на реакторную установку (рис. 4, 5); заваливание контейнера с промежуточным теплообменником на трубопровод II контура (рис. 6,7); падение контейнера с теплообменником на поворотное надреакторное перекрытие (рис. 8,9); падение внутриобъектового транспортного упаковочного комплекта (рис. 10, 11); падение ТВС (рис. 12-14).

Все расчеты выполнены с использованием модуля динамических расчетов LS-DYNA аттестованного в Ростехнадзоре ПК ANSYS [13], основанного на методе конечных элементов. Модуль LS-DYNA предназначен для расчетного анализа высоконелинейных динамических процессов по явной схеме интегрирования уравнений динамики.

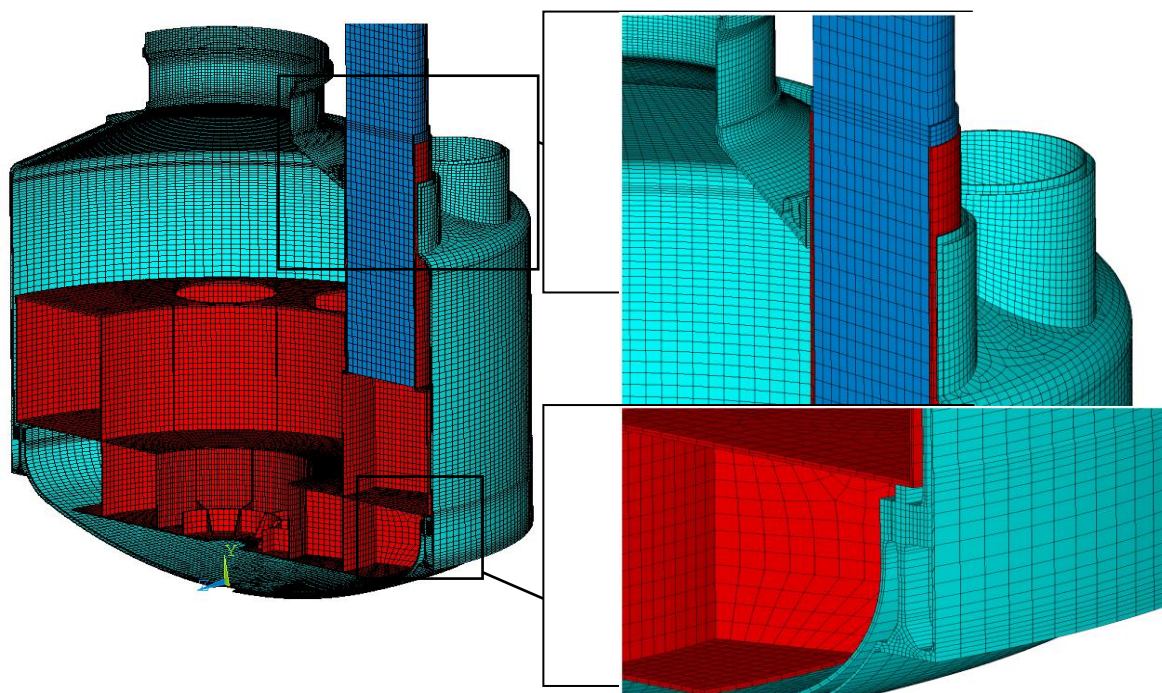


Рис. 4. Конечно-элементная расчетная модель реактора

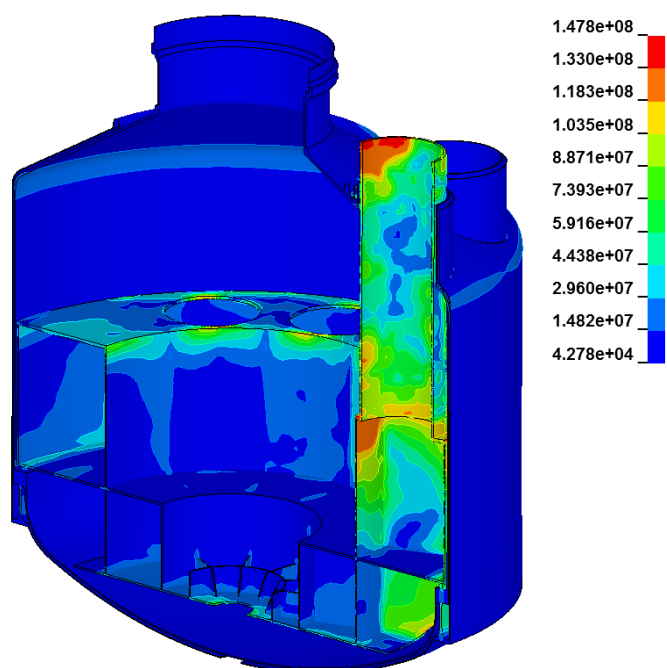


Рис. 5. Распределение напряжений SINT в конструкции на момент передачи ударного импульса на опорный пояс, Па

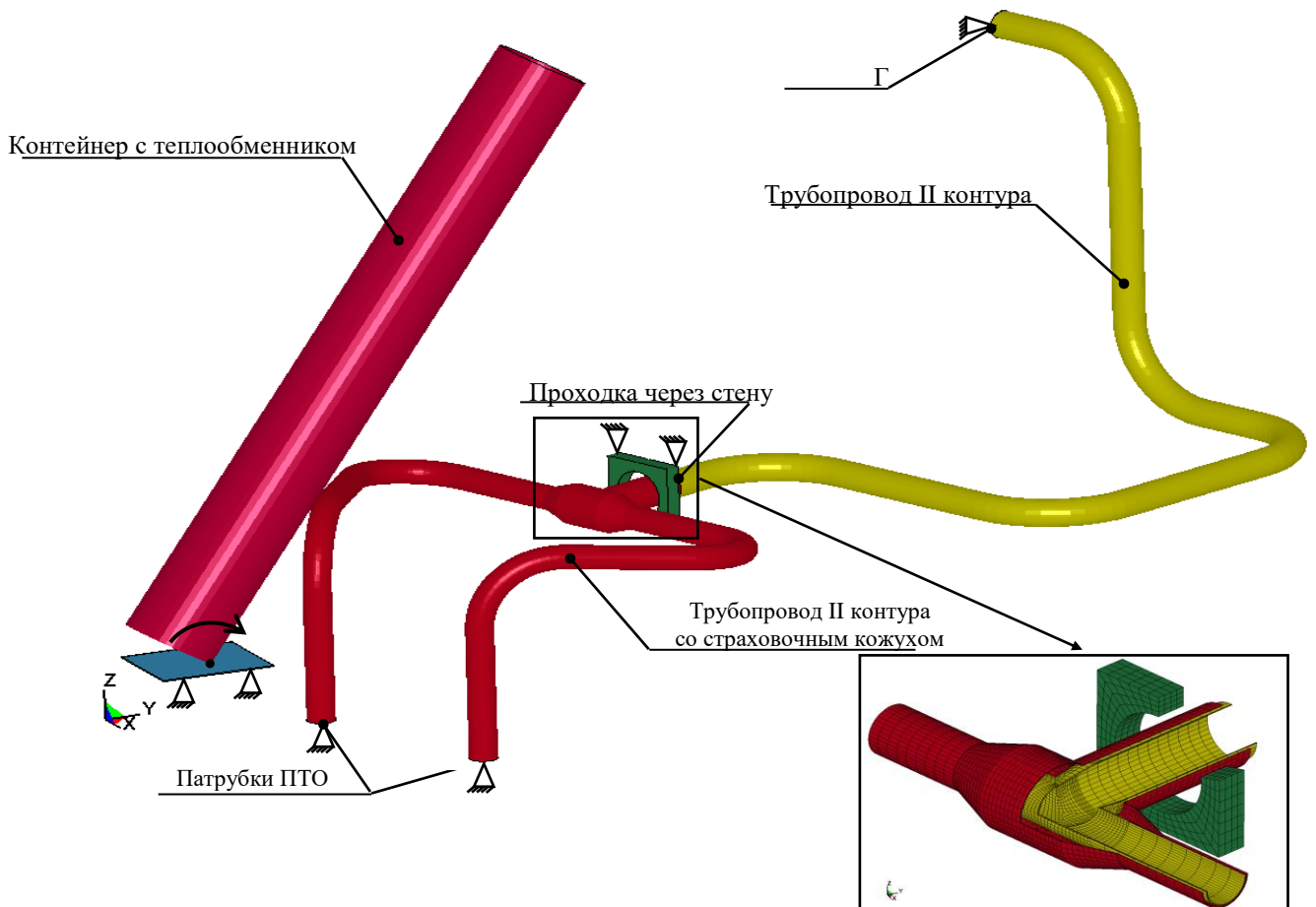


Рис. 6. Расчетная модель трубопровода II контура с падающим на него контейнером

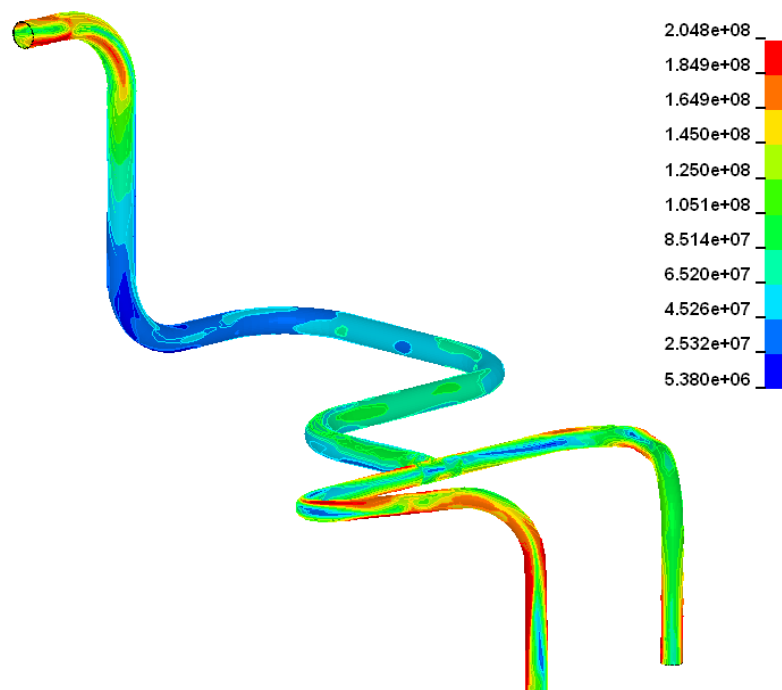


Рис. 7. Распределение напряжений SINT в трубопроводе II контура для характерного временного интервала, Па

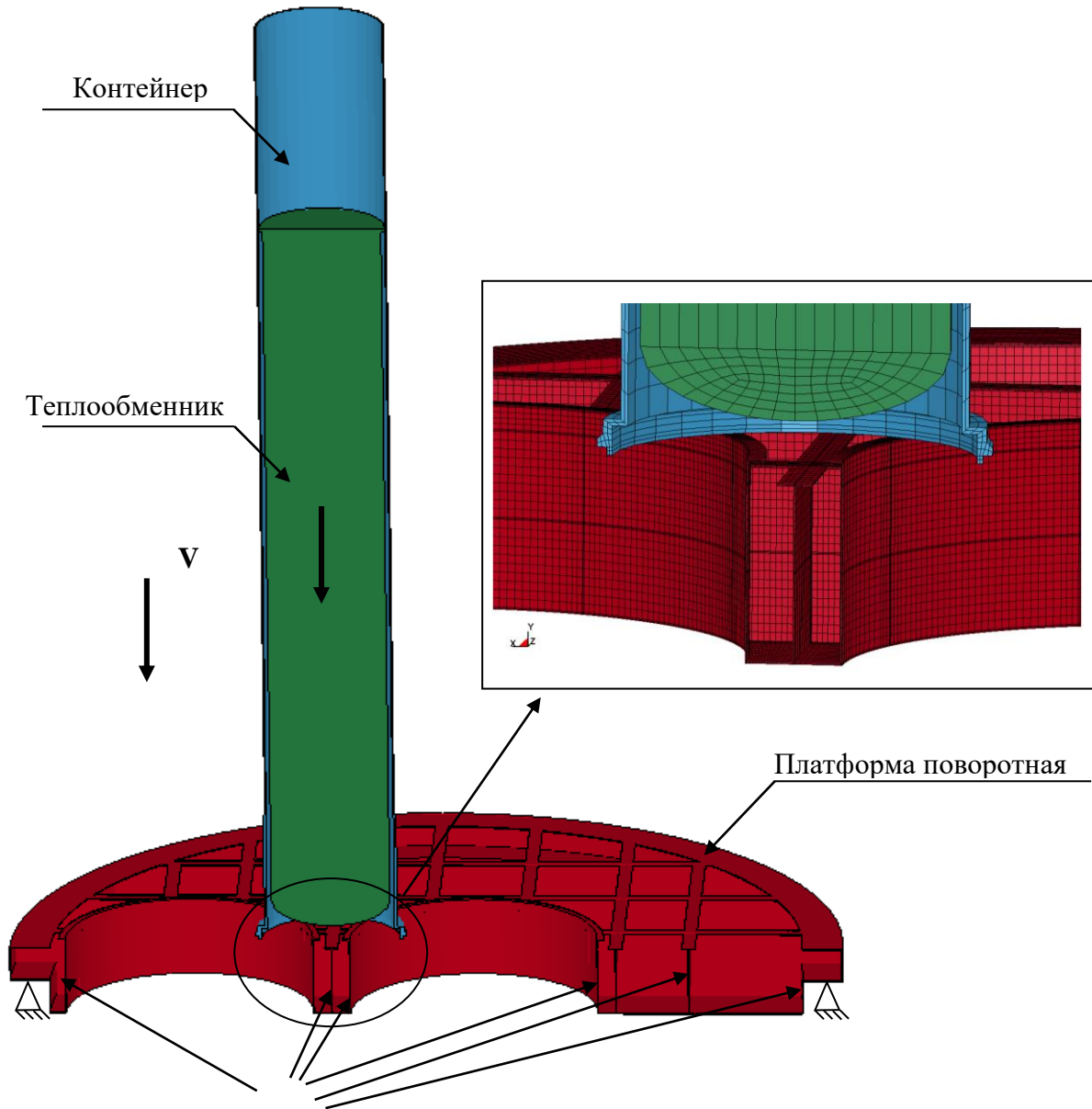


Рис. 8. Расчетная модель поворотного надреакторного перекрытия, с падающим на него теплообменником и контейнером

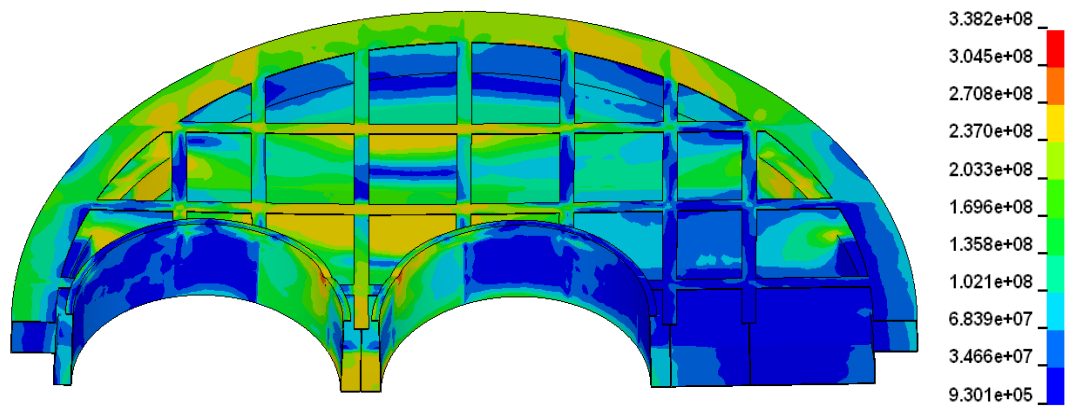


Рис. 9. Распределение напряжений SINT в поворотном надреакторном перекрытии для характерного временного интервала, Па

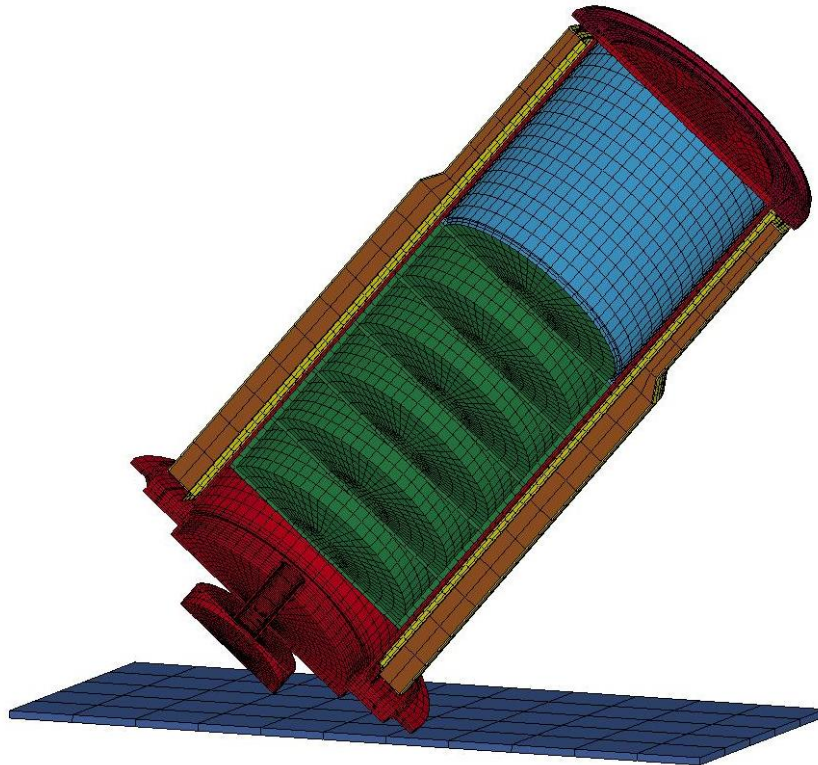


Рис. 10. Расчетная модель транспортно-упаковочного комплекта, падающего под углом к горизонтальной плоскости

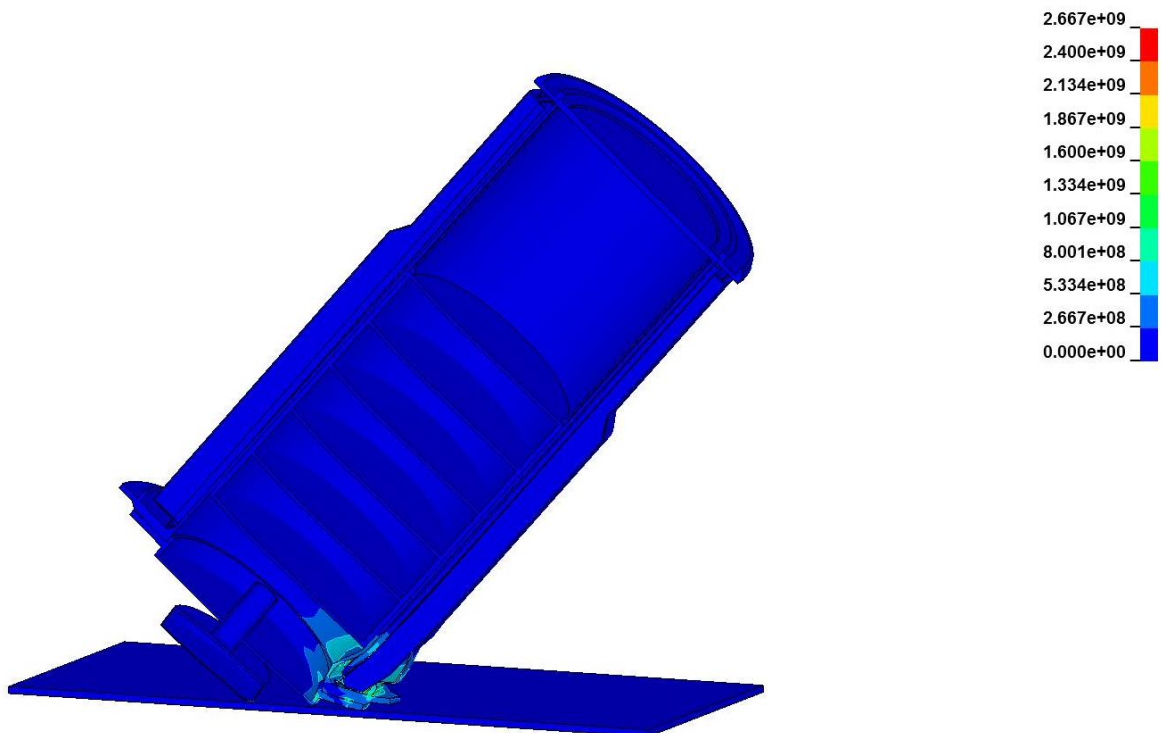


Рис. 11. Распределение напряжений SINT в конструкции для характерного временного интервала, Па

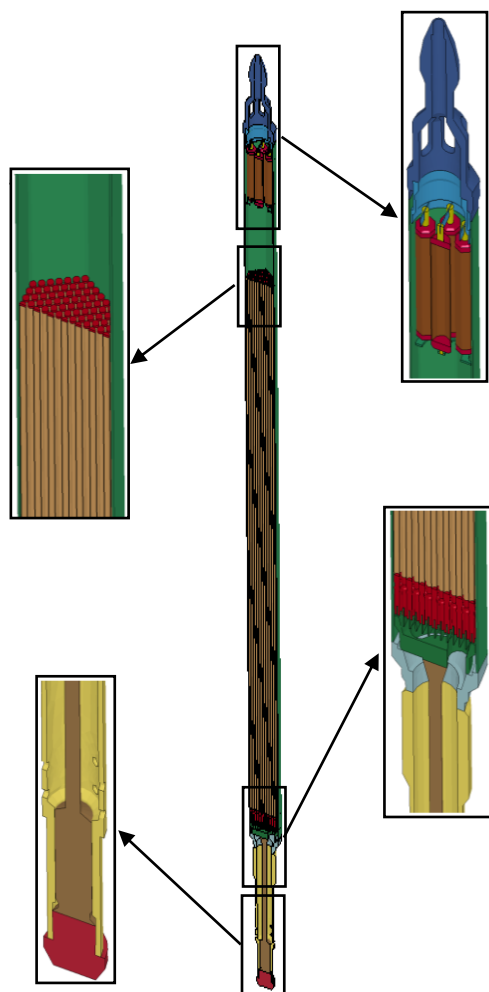


Рис. 12. Расчетная модель ТВС

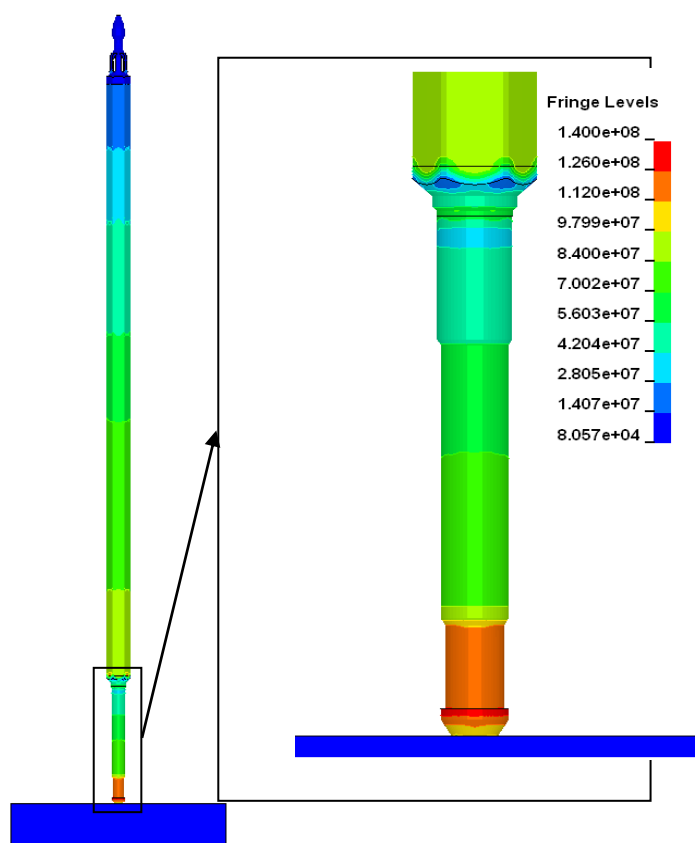


Рис. 13. Распределение осевых напряжений макета ТВС при ударе, Па

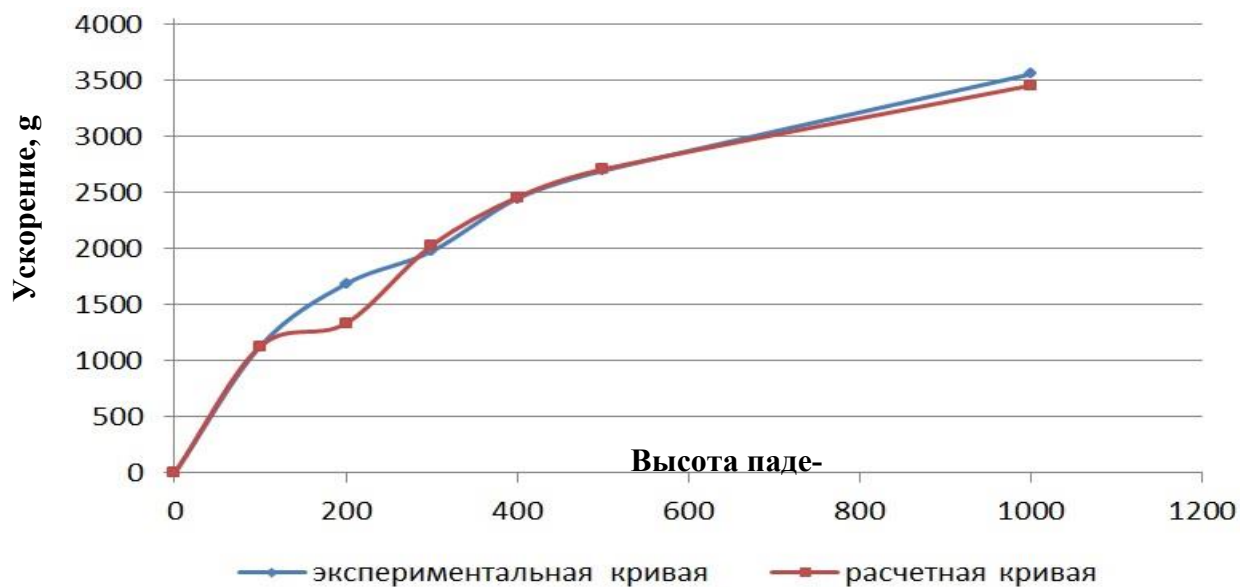


Рис. 14. Ускорение макета ТВС в характерном сечении при падении с различных высот, в долях g

Для ситуаций, не классифицированных как ННЭ или ПА, выполняется оценка по предельному состоянию с использованием критериев разрушения. В качестве критерия разрушения материала предложена деформация разрушения $\varepsilon_{пред}$ при кратковременных стандартных испытаниях на растяжение образца. Она определена по относительному поперечному сужению ψ сечения образца в месте разрыва [14] (3):

$$\varepsilon_{пред} = \ln\left(\frac{1}{1 - 0,01 \cdot \psi}\right). \quad (3)$$

Вопрос разработки критериев разрушения, их численных величин представляет собой тему отдельного исследования. Часть проектируемого оборудования разработана на основе верифицированных расчетных моделей. На базе экспериментального комплекса ОА «ОКБМ Африкантов» испытан на ударостойкость макет ТВС. Расчетный анализ конструкции и экспериментальные данные по ряду параметров показали хорошую сходимость (рис. 12-14).

Заключение

Проблемы обеспечения прочности и сохранения целостности оборудования для ядерных энергетических установок при динамических воздействиях высокой интенсивности весьма актуальны при обосновании безопасности. Импульсы, приходящие на конструкции от ударных нагрузок, являются определяющими при формировании конечного облика проектируемых объектов. По результатам полномасштабного 3D компьютерного моделирования на стадии проектирования в разрабатываемое оборудование внесены конструктивные изменения, направленные на обеспечение радиационной безопасности. Эти рекомендации позволяют оптимизировать конструкции, повышать их надежность и как правило, снижать металлоемкость за счет уменьшения необоснованно заложенных запасов прочности.

Реализованный в работе комплексный подход к выполнению расчетного анализа аварийных ситуаций, связанных с падением оборудования, основан на соблюдении следующих принципов:

- определение реальных сценариев постулируемых аварий на основании анализа транспортно-технологического тракта;
- соблюдение требований к построению расчетных моделей исследуемых конструкций с целью отражения реальных жесткостных и весовых характеристик, обеспечивающих получение достоверных результатов;
- использование физико-механических свойств конструкционных материалов в области значительных пластических деформаций при их высокоскоростном динамическом нагружении (определение на этой основе параметров математических моделей конструкционных материалов, адекватно описывающих процесс высокоскоростного деформирования и разрушения);
- использование современных высокопроизводительных аттестованных конечно-элементных вычислительных комплексов расчета НДС и прочности конструкций ОИАЭ, позволяющих учитывать интенсивные воздействия ударного характера;
- выполнение, нормативных требований безопасности, предъявляемых к ОИАЭ, содержащих радиоактивные материалы, применительно к случаям их аварийных падений.

Использование такого подхода позволяет решать целый класс задач, связанных с падением оборудования и обоснованием динамической прочности различных конструкций ОИАЭ, и избежать дорогостоящих натурных испытаний, что, в свою очередь, способствует повышению конкурентоспособности изделий за счет снижения его себестоимости.

Библиографический список

1. **Кольский, Г.** Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // *Механика*. – 1950. – №4. – С. 108-119.
2. **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.*
3. **Bragov, A.M.** Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method / А.М. Bragov, А.К. Lomunov // *Int.J. of Impact Engineering*, 1995. – 16(2), p.321-330.
4. **Nicholas, T.** Tensile testing of materials at high rates of strain / T. Nicholas // *Exp. Mech.* 1981. –Vol. 21. – N 5. – P.177-195.
5. **Брагов, А.М.** Экспериментальный анализ процессов деформирования и разрушения материалов при скоростях деформации 10^2 – 10^5 с⁻¹: Дисс.... докт.техн.наук. Нижегород.ун-т. 1998.
6. **Johnson, G.R.** A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic / G.R. Johnson, W.H. Cook // *The Hague, The Netherlands*, 1983, – P. 541-547.
7. **Huh, H.** Crash-Worthiness Assessment of Thin-Walled Structures with the High-Strength Steel Sheet / H Huh, W.J.Kang // *International Journal of Vehicle Design*, Volume 30, Numbers 1/2, 2002.
8. **Allen, D.J.** Optimizing Material Strength Constants Numerically Extracted from Taylor Impact Data / D.J. Allen, W.K. Rule, S.E. Jones // *Experimental Mechanics*, Volume 37, Number 3, September, 1997.
9. **Cowper, G.R.** Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams / Cowper, G.R., P.S. Symonds, Brown University, Applied Mathematics Report, 1958.
10. **Константинов, А.Ю.** Экспериментально-расчетное исследование поведения конструкционных материалов под действием динамических нагрузок: Дисс... канд. техн. наук. – Н. Новгород, 2007.
11. **Котов, В.Л.** Численное моделирование плоскопараллельного движения конических ударников в упругопластической среде / В.Л. Котов, А.Ю. Константинов, Ю.И. Кибец, А.А. Тарасова, В.П. Власов // *Проблемы прочности и пластичности*. – Т. 75. – № 4. – 2013. – С. 303-311.
12. **Rodriguez, T.** Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials / T. Rodriguez, C. Navarro, V. Sanchez-Galvez // *Journal de Physique IV*, 1994. – P.101-106.
13. Программный комплекс ANSYS. Аттестационный паспорт программного средства №327 от 18.04.2013.
14. **Надаи, А.** Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – М.: Издательство иностранной литературы, 1954.

*Дата поступления
в редакцию: 20.10.2020*

O.Yu. Vilenskiy¹, S.A. Dushev¹, D.A. Lapshin¹, E.G. Novinskiy¹, V.A. Pakhomov¹,
A.M. Tatarskiy¹, M.A. Legchanov²

MATHEMATICAL MODELS OF STRUCTURAL MATERIAL DEFORMATION UNDER DYNAMIC LOADS FOR APPLIED PROBLEM SOLUTION IN NUCLEAR ENGINEERING

¹Afrikantov OKB Mechanical Engineering

²Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: To increase safety of the equipment under development.

Technology/approach: The paper implements the complex approach to design analysis performance for emergency situations caused by equipment falling based on observance of requirements to design model development and use of structural material properties under high-speed loading.

Substantiation: The mathematical model of structural material behavior under high intensity impact has been identified, and also verification of this model by comparison with the results of experiments has been performed.

Result: As a result of full-scale 3D modeling, design changes have been made to the equipment under development aimed at ensuring radiation safety with regard to situations related to possible equipment fall.

Key words: Mathematical deformation model, structural material, experimental study, movable equipment fall, dynamic loading, NPU safety.