

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем машиностроения  
Российской академии наук  
(ИПМ РАН)**

Белинского ул., д. 85, Нижний Новгород, 603024. Тел./факс (831) 432-03-00. E-mail: pevn@uic.nnov.ru  
ОКПО 04836215, ОГРН 1127747300042, ИНН 5262285264, КПП 526201001

**«УТВЕРЖДАЮ»**  
Директор ФГБУН Институт проблем  
машиностроения РАН, профессор, д.ф.-м.н.

 **В.И. Ерофеев**

**« 10 » декабря 2015 г.**

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ  
федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт проблем машиностроения Российской академии наук  
на диссертацию Лапшина Дениса Александровича по теме «Расчетно-  
экспериментальный анализ прочности внутриобъектовых транспортных  
контейнеров реакторов типа БН в авариях с падением», представленную на  
соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности  
01.02.06 - «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»**

Диссертационная работа Д.А. Лапшина посвящена актуальной теме расчётного обоснования прочности и целостности оборудования, в условиях воздействия на них значительных динамических нагрузок, возникающих при постулировании аварийных ситуаций с падением.

Современный этап развития атомной энергетики характеризуется повышенными требованиями безопасности, предъявляемыми к объектам использования атомной энергии. Особое место на таких объектах занимают системы хранения и транспортирования ядерного топлива вследствие существования потенциальной возможности (в детерминистской постановке) возникновения аварийных ситуаций, связанных с падением оборудования при проведении транспортно-технологических операций, что может привести к серьёзным радиационным последствиям.

Для транспортировки радиоактивных материалов применяют специально разработанные для этого контейнеры, которые входят в состав внутриобъектового транспортного упаковочного комплекта, обеспечивающего ядерную и радиационную безопасность. В конструктивном исполнении контейнер является сложным и дорогостоящим изделием. Он должен отвечать требованиям динамической прочности конструкции, подвергающейся воздействию ударных нагрузок высокой интенсивности, обладать при этом определенными демпфирующими качествами, позволяющими снижать внешние динамические перегрузки на

транспортируемое оборудование.

Существующая нормативная база прочности не содержит каких-либо количественных критериев допустимости повреждения контейнера при аварийном падении. Проведение представительных натурных испытаний контейнера в процессе отработки его конструкции затруднено, прежде всего, в силу его значительной стоимости. Математическая формулировка отмеченных динамических процессов сводится к решению нелинейной трехмерной нестационарной задачи механики деформируемого твердого тела. Решение подобных задач возможно только на основе компьютерного моделирования с применением современных программных комплексов на многопроцессорных вычислительных системах и экспериментальном изучении свойств материалов, что **определяет актуальность диссертационной работы.**

Диссертационная работа Д.А. Лапшина относится к разработке и практическому применению расчётного метода исследования напряжённо-деформированного состояния и поведения конструкций в области их значительного пластического деформирования.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения:

**Во введении** обоснована актуальность компьютерного и экспериментального анализа процесса деформирования ВТУК при динамическом нагружении с целью создания конструкций, удовлетворяющих требованиям ударостойкости в аварийных ситуациях, и обеспечения радиационной безопасности при проведении транспортно-технологических операций, формулируются цели и задачи диссертационной работы.

**В первой главе** приведен обзор основных результатов экспериментальных исследований деформационных и прочностных характеристик конструкционных материалов, применяемых в атомной энергетике, математических моделей, численных методов и программных кодов, которые используются для исследования нестационарного деформирования сложных составных конструкций.

**Во второй главе** приведены определяющая система уравнений, а также конечно-элементная методика исследования процессов деформирования упругопластических конструкций при высокоскоростном динамическом нагружении с учетом их зависимости от температуры и скорости деформации.

Для описания движения конструкций применяются переменные Лагранжа. Уравнение движения выводится из вариационного принципа баланса виртуальных мощностей. В качестве уравнений состояния используются соотношения теории течения с кинематическим и изотропным упрочнением. Контактное взаимодействие элементов конструкции моделируется условиями непроникания.

Решение поставленной задачи при заданных начальных и граничных условиях основано на методе конечных элементов и явной схеме интегрирования по времени типа «крест». Изложенная схема метода конечных элементов реализована в рамках вычислительного комплекса ANSYS/LS-DYNA (лицензия № D334623 от 02.06.2005 г.).

Приведены основные результаты верификации программного комплекса ANSYS/LS-DYNA на ряде специально подобранных задач путем сопоставления результатов расчетов с результатами аналитического решения и экспериментальными данными. Анализируются результаты численного и экспериментального исследования деформирования макетов ТВС и гильзы СУЗ при соударении с недеформируемым основанием. Натурные эксперименты, выполнены на базе экспериментальной лаборатории АО «ОКБМ Африкантов».

По результатам исследований подготовлен верификационный отчет и осуществлена аттестация программного комплекса ANSYS/LS-DYNA в НТЦ ЯРБ Ростехнадзора РФ (аттестационный паспорт № 327 от 18.04.13 г.). Результаты исследований позволили сделать заключение о возможности применения данного программного продукта при анализе сложных многокомпонентных конструкций АЭУ в условиях нагружения, соответствующих аварийным ситуациям, связанных с падением.

**В третьей главе** приводятся результаты экспериментального исследования поведения конструкционных материалов ВТУК в зависимости от скорости деформации и температуры.

Для определения механических свойств исследуемых материалов при высокоскоростном нагружении использовался метод Кольского с различными вариантами разрезного стержня Гопкинсона. В результате получены диаграммы деформирования при различных режимах нагружения. По ним определены пределы прочности и их зависимость от скоростей деформаций и температуры. Для оценки изменения прочности в широком диапазоне скоростей деформации, проведено сопоставление результаты динамических и статических экспериментов. По результатам статических и динамических испытаний образцов при сжатии и растяжении определены механические характеристики конструкционных материалов (диаграммы деформирования, пределы текучести, временное сопротивление разрыву, модуль упругости, предельные характеристики пластичности и т.д.), получены параметры модели пластичности Джонсона-Кука из библиотеки программного комплекса ANSYS/LS-DYNA. Отмечено, что исследованные стали имеют различную чувствительность механического поведения к скорости деформации и температуре.

Для проверки адекватности модели пластичности Джонсона-Кука 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 натуральных испытаний и численного моделирования, как по остаточным формам образцов, так и по временным характеристикам динамики процесса пластического деформирования.

Результаты сравнения данных натуральных и вычислительных экспериментов позволили сделать вывод о достоверности и достаточной точности математических моделей, построенных для исследованных в работе материалов, и свидетельствуют о применимости данных моделей для анализа напряженно-деформированного состояния и прочности исследуемой конструкции в условиях динамических нагружений.

**В четвертой главе** приведены основные положения численного анализа проектной аварии, связанной с падением внутриобъектового транспортного контейнера при транспортно-технологических операциях, включающие:

- определение сценария аварии на основании анализа транспортно-технологического тракта;
- учет требований нормативных документов безопасности к объекту исследования;
- выбор критериев построения расчетных и компьютерных моделей, оценки динамической прочности и целостности конструкций.

В настоящей главе описан комплексный экспериментально-расчетный подход оценки последствий аварийной ситуации, связанной с падением оборудования объектов использования атомной энергии при проведении транспортно-технологических операций.

В качестве критерия динамической прочности принималась деформация разрушения материала, полученная по результатам серии динамических экспериментов.

На основании полученных результатов в первоначальную конструкцию контейнера были внесены конструктивные изменения, позволившие в дальнейшем установить следующее:

- во всех рассматриваемых случаях падения разъем усовершенствованного контейнера не раскрывается, а в силовом корпусе образования сквозных трещин не происходит;
- корпус контейнера при взаимодействии с элементами ТВС испытывает пластическую деформацию, не приводящую к его разрушению;
- выпадения ядерного топлива из контейнера не происходит;
- в результате падения, внутриобъектовый транспортный контейнер, переходит в предельное состояние, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима, а восстановление нецелесообразно.

В процессе анализа было выявлено, что толщины стенок основного корпуса контейнера имеют не обоснованный запас прочности. За счет уменьшения толщины стенок удалось снизить металлоемкость конструкции на 20%.

Выполненная доработка контейнера на стадии проектирования и последующий

динамический анализ прочности позволил оптимизировать конструкцию и подтвердить его работоспособность при выполнении всех требований нормативных документов.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы по работе.

Расчетный и экспериментальный анализ конструкции контейнера, выполненный на стадии проектирования, позволил внести конструктивные рекомендации, направленные на обеспечение радиационной безопасности применительно к ситуациям, связанным с их возможным падением.

Применение данного подхода позволяет оптимизировать конструкцию, повышая ее надежность и снижая металлоемкость за счет уменьшения возможных необоснованно заложенных запасов.

Использование предварительного полномасштабного 3-D расчетного моделирования на стадии проектирования позволяет сократить дорогостоящие натурные испытания и способствует повышению конкурентоспособности изделий.

В процессе выполнения работы была проведена верификация и валидация программного комплекса ANSYS/LS-DYNA. Анализ полученных результатов позволил сделать обоснованный вывод о его применимости для исследования упругопластического деформирования и оценки прочности конструкций ядерной энергетики при динамических воздействиях. Подготовлен верификационный отчет и осуществлена аттестация программного комплекса ANSYS/LS-DYNA в НТЦ ЯРБ Ростехнадзора РФ (аттестационный паспорт № 327 от 18.04.13 г.). Дополнена библиотека материалов данного комплекса верифицированными математическими моделями поведения материалов с большими пластическими деформациями при динамических воздействиях высокой интенсивности. Верифицированный и аттестованный программный комплекс внедрен в АО «ОКБМ Африкантов».

Использование такого подхода позволяет решать целый класс задач, связанных с падением оборудования и обоснованием динамической прочности различных конструкций.

**Научная новизна** работы заключается в том что:

- получены динамические свойства исследуемых материалов в диапазоне скоростей деформаций от  $10^0 \text{ с}^{-1}$  до  $10^3 \text{ с}^{-1}$  в сочетании с адиабатическим разогревом материала в контактной зоне деформирования;

- идентифицированы и верифицированы математические модели поведения исследованных конструкционных материалов описывающие их высокоскоростное деформирование и разрушение;

- для впервые разработанной конструкции контейнера, созданы и обоснованы их конечно-элементные модели в условиях ударного нагружения;

- определены сценарии соударений при аварийных падениях на основе анализа конструкции транспортно-технологического тракта и нормативных требований безопасности, предъявляемых к объектам использования атомной энергии;

- получены новые расчетно-экспериментальные характеристики прочности и целостности внутриобъектового транспортного контейнера при его аварийном падении на жесткую преграду, на основании которых внедрены конструктивные изменения.

**Теоретическая и практическая значимость** работы:

- разработаны конечно-элементные модели, позволяющие обосновывать прочность и целостность такого класса оборудования как внутриобъектовые контейнеры, в аварийных ситуациях, связанных с их постулированным падением в процессе выполнения транспортно-технологических операций;

- дополнена библиотека материалов ПК ANSYS/LS-DYNA верифицированными математическими моделями, позволяющая в последствии решать класс задач связанный с динамическим поведением материалов в диапазоне скоростей деформаций от  $10^0 \text{ с}^{-1}$  до  $10^3 \text{ с}^{-1}$ ;

- результаты проведенного расчетного анализа прочности транспортного контейнера при реализации аварийных ударных нагрузок и экспериментального анализа динамических свойств материалов, использованы при разработке конструкции контейнера и обосновании его целостности на этапе технического проекта РУ БН-800 (введены новые конструктивные

элементы, уменьшена металлоемкость конструкции);

- верифицированный и аттестованный ПК ANSYS/LS-DYNA внедрен в АО «ОКБМ Африкантов» (аттестационный паспорт № 327 от 18.04.13 г. получен в НТЦ ЯРБ Ростехнадзора РФ).

**Достоверность результатов** подтверждена:

- верификацией и валидацией расчетного комплекса;  
- верификацией математических моделей деформирования конструкционных материалов при динамическом нагружении на основании экспериментальных исследований (определение параметров модели пластичности Джонсона-Кука из библиотеки LS-DYNA);

- хорошим соответствием с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными других авторов в вопросе поведения сложных многокомпонентных конструкций в условиях воздействия на них ударных нагрузок, сопровождающихся значительными пластическими деформациями.

Результаты диссертационной работы достаточно полно представлены автором на ряде международных и всероссийских конференций. В печатных изданиях опубликованы 8 работ, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Автореферат отражает содержание диссертационной работы.

**Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки**

Разработанные модели и результаты исследований внедрены в расчетную практику АО «ОКБМ Африкантов». Дополнена библиотека материалов программного комплекса ANSYS/LS-DYNA. По результатам полномасштабного 3-D компьютерного моделирования в проект БН-800 внесены рекомендации, направленные на обеспечение радиационной безопасности применительно к ситуациям, связанным с возможным падением транспортного контейнера. Сделанные рекомендации позволили оптимизировать конструкцию ВТУК, повысить его надежность и снизить металлоемкость.

Подготовлен верификационный отчет и осуществлена аттестация ПК ANSYS/LS-DYNA в НТЦ ЯРБ Ростехнадзора РФ (аттестационный паспорт № 327 от 18.04.13 г.).

Использованный в диссертационной работе комплексный подход позволяет решать целый класс задач, связанных с падением оборудования и обоснованием динамической прочности различных конструкций.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации.** Верифицированные математические модели поведения исследованных материалов при динамических нагружениях, оснащенные параметрами полученными автором могут быть использованы в Институте проблем машиностроения РАН, Институте механики МГУ, Институте проблем механики РАН, лабораториях технических университетов Министерства образования и науки РФ, в инженерной практике НИИ и КБ машиностроения, авиастроения, а также других организациях, занимающихся расчетом прочности конструкций при ударных и импульсных воздействиях.

В качестве **замечаний** по диссертации отметим следующие:

- не раскрыты вопросы, касающиеся демпфирующих элементов, «смягчающих» действие ударных воздействий (не только оптимизация конструкции, но и применение дополнительных элементов, специального предназначения для погашения ударных воздействий).

- не отражены особенности моделирования и расчета ударной нагрузки разъемных соединений.

- есть погрешности в оформлении работы (некоторые рисунки малоинформативны, можно было обойтись без них).

Высказанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации. Оценивая работу в целом, можно сделать вывод, что работа выполнена на высоком научно-

техническом уровне. Актуальность работы не вызывает сомнений.

Диссертационная работа «Расчетно-экспериментальный анализ прочности внутриобъектовых транспортных контейнеров реакторов типа БН в авариях с падением» является законченной научно-квалификационной работой и отвечает требованиям «Положения о присуждения учёных степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, а ее автор Лапшин Денис Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 - «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Отзыв на диссертационную работу составлен и утвержден по результатам обсуждения диссертации на заседании совместного научного семинара лабораторий: экспериментальной механики; волновой динамики и виброзащиты машин ИПМ РАН (Протокол № 5/дисс. от «10» декабря 2015 г.)

Доктор технических наук  
(01.02.06 - «Динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры»),  
заведующий лабораторией  
экспериментальной механики

В.М. Родюшкин

Кандидат технических наук  
(01.02.06 - «Динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры»),  
доцент, старший научный сотрудник  
лаборатории волновой динамики  
и виброзащиты машин .

Е.А. Никитина

Родюшкин Владимир Митрофанович  
[vlkn2005@yandex.ru](mailto:vlkn2005@yandex.ru); (831)432-21-59

Никитина Елена Александровна  
[svs-dynamo@mail.ru](mailto:svs-dynamo@mail.ru); (831)432-23-87  
603024, Нижний Новгород, ул.Белинского,  
85, ИПМ РАН