



Применение программного комплекса ABAQUS в атомной промышленности

Сергей Рыжов, Кирилл Ильин

В настоящее время мировое сообщество уделяет повышенное внимание энергетическим ресурсам. Трудно переоценить роль атомной энергетики в этом вопросе. Проектирование новых современных атомных станций, обеспечение их безопасной и надежной работы относятся к приоритетным инженерным задачам.

ABAQUS является мировым лидером в области инженерных прочностных расчетов для атомной энергетики как надежный и качественный программный код, позволяющий решать практически любые сложные нелинейные задачи с учетом реального поведения конструкции при различных видах нагружения, в том числе взаимодействия здания АЭС с грунтами.

В статье представлен краткий обзор возможностей программного комплекса ABAQUS, а также даны результаты ряда исследований, проведенных для реальных объектов при использовании ABAQUS в атомной энергетике.

Общая характеристика программного комплекса ABAQUS

Конечно-элементный комплекс ABAQUS — это универсальная программа общего назначения, предназначенная для проведения многоцелевого инженерного многодисциплинарного прочностного анализа поведения сложных конструкций.

ABAQUS широко применяется в различных отраслях промышленности:

- производство энергии (ABB, AEA Technology, EPRI, институт «Атомэнергoproject»);
- автомобилестроение (BMW, FORD, General Motors, Mercedes, Toyota, Volvo, Goodyear);
- авиастроение/оборона (General Dynamics, Lockheed Martin, US Navy, Boeing);
- электроника (Intel, Hewlett-Packard, Motorola, IBM, Digital);
- металлургия (British Steel, DuPont, Новокраматорский машиностроительный завод);
- нефтедобыча и переработка (Exxon/Mobil, Shell, Dow);
- производство товаров народного потребления (3M, Kodak, Gillette);
- общая механика и геомеханика (GeoConsult, ISMES, ВНИИГ им.Веденеева).

Одним из серьезных преимуществ ABAQUS является возможность решения связанных задач мультифизики в области прочности конструкций для следующих типов анализа:

- тепло — механика (последовательное или полностью сопряженное решение);
- тепло — электричество;
- поток в пористой среде — механика;
- напряжения — диффузия массы (последовательно сопряженное решение);
- пьезоэлектрика;
- акустика — вибрации.

Программный комплекс ABAQUS позволяет учесть как физические, так и геометрические нелинейности, имеет большую библиотеку конечных элементов и позволяет исследовать всевозможные модели таких материалов, как металлы, бетон, грунты, эластомеры, композиты и т.д.

Комплекс ABAQUS построен по модульному принципу и состоит из двух основных модулей: решателей (солверов) ABAQUS/Standard и ABAQUS/Explicit, препроцессора ABAQUS/CAE, а также из дополнительных модулей, учитывающих особенности специфических проблем (ABAQUS/Aqua, ABAQUS/Design,

ABAQUS/Safe). Все модули удачно дополняют друг друга.

ABAQUS/Standard — один из двух основных решателей программного комплекса ABAQUS, использующий неявную формулировку метода конечных элементов. ABAQUS/Standard позволяет использовать различные методы анализа статике и динамики конструкций во временной и частотной области.

ABAQUS/Explicit — решатель для сильно нелинейных переходных быстротекущих динамических процессов, использующий явную схему интегрирования метода конечных элементов. На рис. 1 в качестве примера представлено моделирование аварийного падения тепловыделяющей сборки водяного атомного реактора на жесткое основание, выполненного в Национальной инженерной лаборатории в Айдахо (США).

ABAQUS/Design — дополнительный модуль к ABAQUS/Standard, позволяющий анализировать чувствительность к изменению параметров конструкции и проводить оптимизацию.

ABAQUS/Aqua — дополнительный модуль к ABAQUS/Standard, позволяющий анализировать нагрузки на кабели, трубопроводы и другие конструкции, погруженные в воду.

Сергей Рыжов

Окончил Московский физико-технический институт в 1979 году по специальности «Вычислительная математика». Кандидат физ.-мат. наук. Начальник отдела систем проектирования и инженерного анализа компании «ТЕСИС».

Кирилл Ильин

Окончил Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова в 1996 году по специальности «Математика, прикладная математика». Инженер отдела систем проектирования и инженерного анализа компании «ТЕСИС».

ABAQUS/Safe — модуль, использующий результаты расчета ABAQUS для анализа усталостной прочности, долговечности, ресурсоемкости конструкций.

ABAQUS/ADAMS — интерфейс, позволяющий экспортировать результаты из ABAQUS в ADAMS/Flex.

ABAQUS/CAT — интерфейс, который позволяет готовить модели и просматривать результаты ABAQUS непосредственно в CATIA.

ABAQUS/MOLDFLOW — интерфейс, транслирующий информацию из MOLDFLOW для создания конечно-элементной модели ABAQUS.

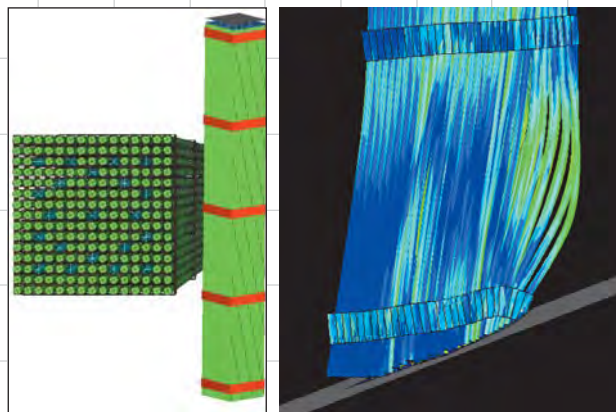


Рис. 1. Моделирование случайного падения тепловыделяющей сборки водяного атомного реактора на жесткое основание

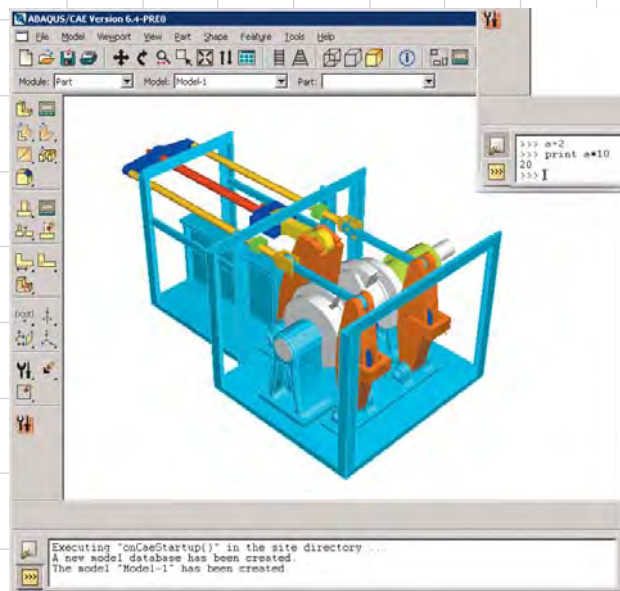


Рис. 2. Графический интерфейс ABAQUS/CAE

ABAQUS/CAE — графическая оболочка для моделирования, управления и мониторинга задач ABAQUS, а также для визуализации результатов расчета ABAQUS. На рис. 2 представлен графический интерфейс ABAQUS/CAE.

Использование программного комплекса ABAQUS в атомной промышленности

Программный комплекс ABAQUS изначально разрабатывался в США для применения в сфере атомной промышленности. ABAQUS удовлетворяет стандартам, установленным Американской ядерной контрольной комиссией для проверки качества проектирования ядерных силовых установок (ANSI/ASME NQA-1, 1983), и международному стандарту качества ISO-9001.

Разрушение предварительно напряженного железобетонного герметичного резервуара (ПНЖР)

Герметичные резервуары применяются в атомной энергетике для обеспечения безопасности на атомных реакторах. Эти резервуары представляют собой сильно армированную предварительно напряженную бетонную конструкцию. Основная задача при проек-



Рис. 3. Прототип ПНЖР в масштабе 1:4 до разрушения (слева) и во время разрушения (справа)

тировании таких конструкций — обеспечение герметичности и надежности конструкции при аварийных ситуациях. Так, ПНЖР может быть нагружен высоким внутренним давлением, которое может привести к такому разрушению конструкции, когда бетонная конструкция деформируется с образованием трещин. Программный комплекс ABAQUS широко используется для анализа поведения подобных конструкций в атомной энергетике¹.

Для того чтобы проверить достоверность численных результа-

тов, получаемых с использованием ABAQUS при решении задачи о величине критического внутреннего давления, которое приводит к разрушению резервуара, был проведен натурный эксперимент на прототипе резервуара в масштабе 1:4 от размера реальной конструкции ПНЖР. Эксперимент проводился в Национальной лаборатории США Санди².

Было проведено два эксперимента на прототипе резервуара:

- тест предельного состояния — Limit State Test (LST);
- тест на разрушение конструкции — Structural Failure Mode Test (SFMT).

В обоих тестах конструкция нагружалась давлением, величина которого была выше эксплуатационной величины. Тест LST проводился для определения величины внутреннего давления,

На рис. 3 представлена модель прототипа до разрушения и во время разрушения.

На рис. 4 приведены геометрические размеры прототипа.

Конструкция состоит из цилиндра и полусферы. Общая высота конструкции составляет 16,4 м, радиус цилиндра — 5,3 м. Толщина стенки цилиндра — 0,32 м, а сферической части — 0,275 м. Нижняя часть цилиндра соединена с основанием высотой 3,5 м.

Бетон имеет как пассивное подкрепление, так и предварительно напряженную арматуру в окружном и продольном (вертикальном для цилиндра и меридиональном для полусферы) направлениях.

Пассивное подкрепление сделано из малоуглеродистой стали, в то время как для предвари-



при котором происходит зарождение трещин и возникает вероятность разгерметизации резервуара. Тест SFMT предназначался для определения внутреннего давления, при котором возникает разрушение резервуара. В обоих тестах измерялись характеристики конструкции и фиксировалась информация о механизме разрушения. Эти данные использовались в качестве эталонных — как для определения моделей материала, так и для проверки результатов численного моделирования.

тельно напряженной арматуры использовалась высокопрочная сталь. Внутренняя часть ПНЖР облицована листами из малоуглеродистой стали толщиной 1,6 мм. Эксплуатационное давление для ПНЖР составляет 0,39 МПа.

Конечно-элементная модель прототипа ПНЖР была разработана Национальным ядерным центром Великобритании³. В дальнейшем эта модель была улучшена с использованием последних возможностей программного кода ABAQUS; в частности, туда

¹ Tang H.T. ABAQUS Applications in Light Water Reactor Safety Analysis. ABAQUS Users Conference Proceedings, 1988.

² Dameron R.A., Hansen B.E., Parker D.R., Rashid Y.R., Hessheimer M. and Costello J.F. Posttest Analysis of the NUPEC/NRC 1/4 Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model, NUREG/CR-6809, U.S. Nuclear Regulatory Commission; SAND2003-0839P, Sandia National Laboratories; ANA-01-0330, ANATECH Corporation.

³ Prinja N.K., Shepherd D. Numerical Simulation of Limit Load Testing of a 1/4 Scale Pre-Stressed Concrete Containment Vessel, Pressure Equipment Technology: Theory and Practice. Professional Engineering Publishing, Institute of Mechanical Engineers, London, 2003.

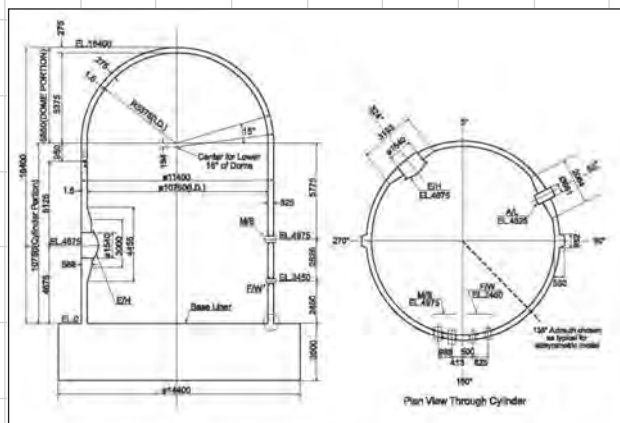


Рис. 4. Геометрия прототипа

была введена новая модель бетона damaged plasticity.

В ABAQUS имеются две различные модели состояния материала для анализа бетонных конструкций. Для моделирования сильно сжатых конструкций, а также конструкций с образованием трещин при растяжении и критического поведения конструкций используется модель с «размазанными» трещинами. Модель damaged plasticity применяется в случае уменьшения упругой жесткости бетона, вызванной пластическим упрочнением как при сжатии, так и при растяжении.

Для моделирования конструкции из бетона используются элементы типа «сольд первого порядка» с применением сокращенного интегрирования (рис. 5). Подкрепления в окружном направлении моделируются с использованием предварительно напряженных элементов типа «gebar». Вертикальные и мериди-

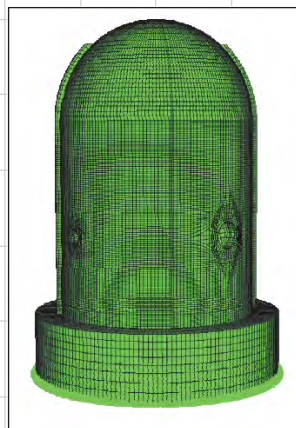


Рис. 5. Недеформированная конечно-элементная модель резервуара

ональные подкрепления моделируются с использованием предварительно напряженных элементов типа «trusses». Внутренняя обшивка резервуара является тонкой и моделируется мембранными элементами. Модель ПНЖР состоит из 150 тыс. элементов и имеет 500 тыс. степеней свободы. Внутреннее давление составляет 2,0 МПа.

Численное исследование с помощью ABAQUS показало следующее.

Некоторые подкрепления в окружном направлении ПНЖР достигают предела текучести при уровне нагрузки около 0,88 МПа. При этой же нагрузке начинают образовываться трещины. При уровне нагрузки около 0,997 МПа практически все подкрепления в окружном направлении достигают предела текучести и возникает интенсивное трещинообразование в зоне окружного подкрепления при значениях 270 и 90° полярного угла. На рис. 6 и 7 представлены результаты для цилиндрической части резервуара. При этом на рис. 6 показан контурный график изменения величины AC YIELD, которая является скалярной величиной, указывающей на области, где достигается предел текучести. Значение «0» указывает на то, что материал подкрепления не превышает предела текучести, а значение «1» — на то, что превышает.

На рис. 7 представлен контурный график переменной DAMAGET, которая является скалярной величиной и указывает на уменьшение модуля упругости бетона после того, как данный

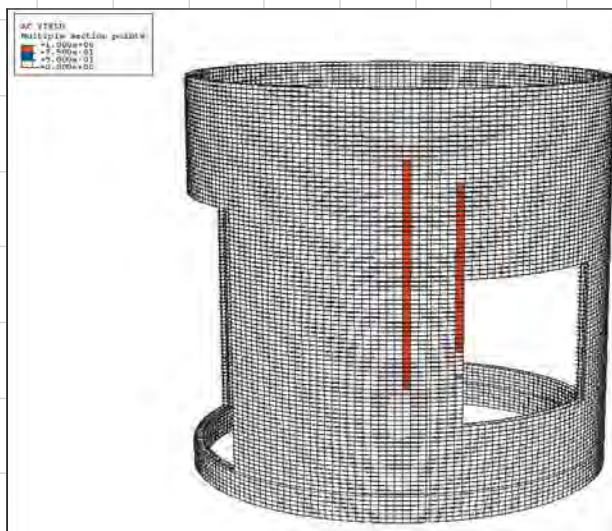


Рис. 6. Контурный график изменения величины AC YIELD при давлении 0,997 МПа

участок длительное время находится в условиях разрушения при трещинообразовании. Области, где подкрепления достигают предела текучести (см. рис. 6), непосредственно связаны с образованием трещин в бетоне. В эксперименте LST разгерметизация резервуара возникала при возникновении продольной трещины в области сварного шва. Утечка, связанная с продольной трещиной, первоначально была обнаружена при давлении, превышающем эксплуатационное давление 0,39 МПа примерно в 2,4-2,5 раза, что составляет около 0,96 МПа. Дальнейшее увеличение давления во время LST-эксперимента приводит к появлению трещин в местах концентрации напряжений и к разгерметизации.

Разрушение конструкции прототипа резервуара возникает при значении внутреннего давления около 1,4 МПа в виде быстрого нарастания скорости изменения перемещений, и потому расчет требуется проводить с очень малыми шагами по времени. Экспериментально измеренное внутреннее давление при возникновении разрушения конструкции резервуара составляет 1,424 МПа.

Контурные графики величины перемещения и DAMAGET вблизи критической нагрузки разрушения резервуара представлены соответственно на рис. 8 и 9.

На рис. 10 и 11 даны графики «нагрузка—перемещение» в двух точках при сравнении экспери-

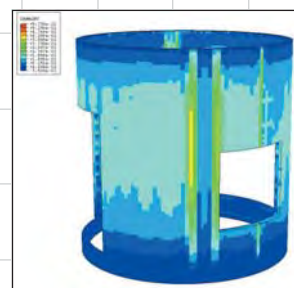


Рис. 7. Контурный график изменения величины DAMAGET при давлении 0,997 МПа

ментальных данных с полученными в ABAQUS

Использование ABAQUS в институте «Атомэнергопроект»

Согласно нормативным документам при проектировании АЭС необходимо проводить расчеты строительных конструкций при особых динамических воздействиях, таких как землетрясение, аварийное падение самолета, действие воздушной ударной волны (ВУВ), а также при аварийном падении контейнера на перекрытие.

Программный комплекс ABAQUS оказался наиболее подходящим для решения вышеуказанных задач. В связи с этим комплекс получил широкое применение при проектировании российских АЭС за рубежом. Обычно производятся расчеты зданий так называемой второй категории сейсмостойкости:

- здания центрального щита управления;

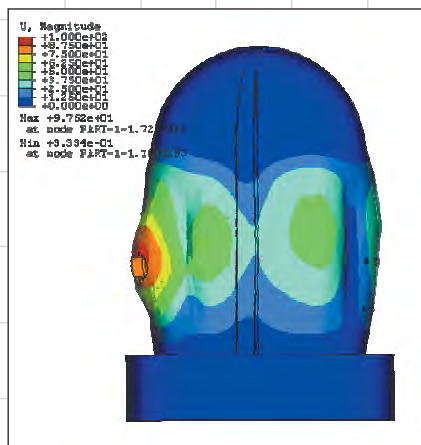


Рис. 8. Контурный график перемещения (scale factor = 8) при давлении 1,52 МПа

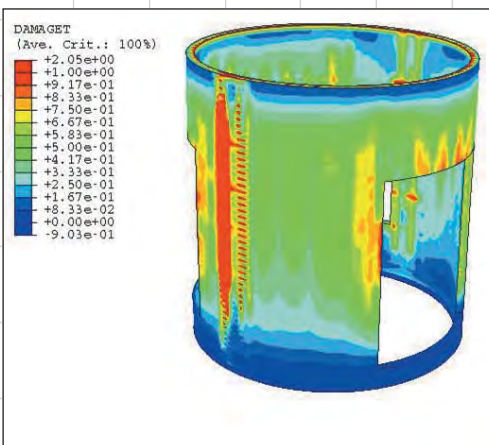


Рис. 9. Контурный график изменения величины DAMAGE при давлении 1,52 МПа

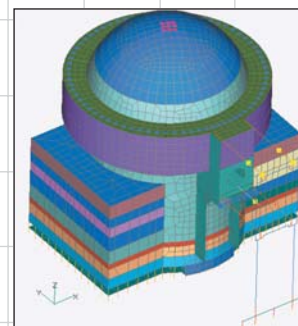


Рис. 12. Конечно-элементная модель здания реакторного отделения

- здания резервного и общестационарного электроснабжения;
- здания комплекса распределительного устройства;
- здания холодильных установок;
- здания хранилища свежего топлива;
- конструкций ресиверов сжатого воздуха и азота.

Моделируется сейсмическое воздействие уровня ПЗ (проектное землетрясение) с помощью акселерограммы, представленной заказчиком. В результате расчетов получаются поэтажные спектры ответа, которые в дальней-

шем используются при разработке оборудования.

Рассчитываемые конструкции представляют собой пространственные системы каркасного типа, которые моделируются элементами пластин и элементами балок. Грунт моделируется элементами пружин.

Расчетная схема здания реакторного зала с транспортным порталом представлена на рис. 12. Число степеней свободы здания реакторного отделения — 1 000 000, число степеней свободы транспортного портала — 2000.

Расчетная схема здания реакторного зала с транспортным порталом представлена на рис. 13. Бетонные колонны фиксируются на балочном основании.

Кроме того, производятся расчеты конструкций первой категории сейсмостойкости при действии акселерограммы уровня МРЗ (максимальное расчетное землетрясение), а также при действии ВУВ и при падении самолета. К числу таких конструкций относятся транспортный портал реакторного отделения и здание общестанционных дизельгенераторов. В результате расчетов для этих зданий получаются поэтажные спектры ответа. Помимо этого определяется динамическое напряженно-деформированное

состояние (НДС) в элементах для назначения уровня армирования в железобетоне и для подбора сечений в металлоконструкциях. Следует отметить, что при определении НДС в транспортном портале проводится нелинейный динамический анализ, учитывающий работу грунта на отрыв. При анализе портала также учитывается многоопорное сейсмическое нагружение за счет использования концепции больших масс.

Решение всех перечисленных задач выполняется либо методом прямого интегрирования уравнений движения, либо методом модальной суперпозиции.

Наибольшую сложность представляет собой решение контактных задач при аварийном падении вентиляционной трубы на защитную оболочку реакторного отделения. При этом решается

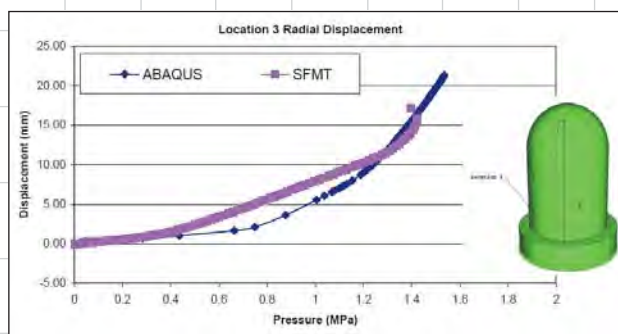


Рис. 10. Сравнение величины радиального перемещения в точке 3, полученного в ABAQUS и измеренного в эксперименте SFMT

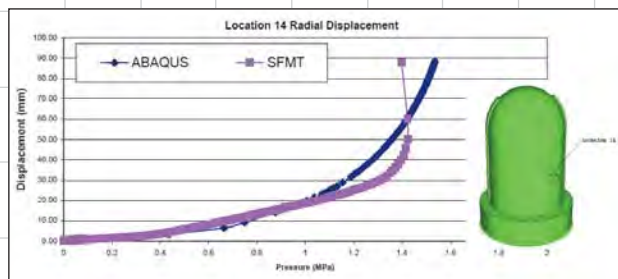


Рис. 11. Сравнение величины радиального перемещения в точке 14, полученного в ABAQUS и измеренного в эксперименте SFMT

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

ТесИС ВНЕДРЕНИЕ
СОПРОВОЖДЕНИЕ
КОНСАЛТИНГ

АКУСТИКА **LMS**
ENGINEERING INNOVATION

ПРОЧНОСТЬ **ABAQUS**

АЭРОДИНАМИКА **FlowVision**
CFX

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ
ДАВЛЕНИЕМ **DE FORM**

127083, МОСКВА, УЛ. ЮННАТОВ 18, ОФ. 701-708
Тел/Факс: (095) 612-44-22, 612-42-62
www.tesis.com.ru info@tesis.com.ru

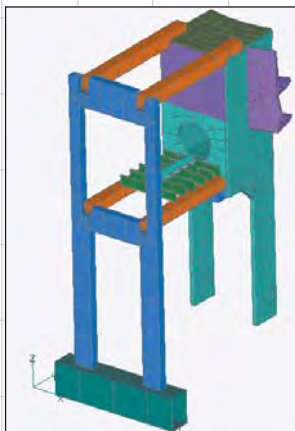


Рис. 13. Модель транспортного портала с учетом геометрии поперечных сечений

нелинейная динамическая задача, учитывающая нелинейность, связанную с прерывистым контактным взаимодействием, нелинейность материала трубы за счет возникновения пластических деформаций и геометрическую нелинейность. Защитная оболочка моделируется как абсолютно жесткое тело. В результате определяется передаваемый трубой импульс на защитную оболочку. Этот импульс при необходимости может использоваться для определения позтажных спектров ответа.

Методом контактного взаимодействия решается также задача о падении контейнера на железобетонное перекрытие. При этом перекрытие моделируется элементами сплошной среды, что позволяет учесть волновые эффекты, возникающие при падении контейнера.

При моделировании используется новая модель бетона с трещинообразованием и критическим поведением материала, учитывающего деградацию модуля деформирования и взаимодействие нелинейного бетона с арматурой в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

При решении динамических задач ударного типа рекомендуется использовать метод прямого интегрирования с переменным шагом по времени, что значительно повышает эффективность расчета при сохранении точности. Время анализа при этом уменьшается примерно в 4-5 раз для всех рассмотренных задач.

Заключение

Благодаря возможности решения самых сложных задач программный комплекс ABAQUS завоевал лидирующее положение на мировом рынке. В настоящее время это один из ведущих и общепризнанных программных продуктов CAE универсального назначения. Для многих предприятий мира ABAQUS стал инструментом, позволяющим решать самые сложные проблемы с высокой степенью надежности и качества.

Общность подходов, простота использования, понятная и полная документация, достоверность получаемых результатов, надежная поддержка пользователей делают ABAQUS обсо-

ванным выбором для любого предприятия, имеющего потребность в инженерном анализе, в том числе для предприятий атомной энергетики.

Программный комплекс ABAQUS имеет коммерческую, исследовательскую и учебную версии. В 2004 году фирма ABAQUS выпустила демо-версию ABAQUS Student Edition для свободного распространения среди научных работников, студентов и инженеров. Компания «ТЕСИС» совместно с Московским физико-техническим институтом разработала для студентов высших учебных заведений курс лекций и практических занятий по основам ABAQUS.

Материал данной статьи основан на совместных работах ком-

пании «ТЕСИС» (официальный дистрибьютор ABAQUS на территории России, Украины и Белоруссии) и Института «Атомэнергоспроект» (пользователь программы ABAQUS с 1995 года). Результаты этих работ⁴ были представлены на международных конференциях пользователей ABAQUS, которые проходили в Маастрихте (Нидерланды), Мюнхене (Германия), Бостоне (США) и Стокгольме (Швеция) и изложены в трудах этих конференций. ■

⁴ Korotkov V., Poprygin D., Ilin K., Ryzhov S. Analysis of Floor Response Spectra in Reactor Building of NPP at Air ShockWave Impact. ABAQUS User's Conference Proceedings. Stockholm, 2005.

НОВОСТИ

Специальная версия ABAQUS Student Edition

Компания ABAQUS Inc., ведущий производитель программных комплексов для конечно-элементного анализа, расширяет возможности ознакомления вузов со своим программным обеспечением. Специальная версия ABAQUS Student Edition предоставляет возможность преподавателям, аспирантам и студентам познакомиться с последними достижениями компании ABAQUS, Inc. в области создания современных программных комплексов для инженерных расчетов сложных конструкций с учетом различных физических явлений. Эта версия, реализованная на платформе Windows, не требует лицензии, включает основные решатели ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit и пре/постпроцессор ABAQUS/CAE, а также содержит полную online-документацию. Единственное ограничение — размер конечно-элементной модели: число узлов и число элементов модели не должно быть более 1000. Версия может быть использована в учебном процессе при изучении механики деформируемого твердого тела, прочности, теплопрочности и т.д.

Компания LMS International стала первым партнером Dassault Systemes в создании многодисциплинарной среды нового поколения SIMULIA

20 февраля Dassault Systemes, мировой лидер в 3D- и PLM-решениях, и бельгийская компания LMS International, объявили о том, что LMS стала первым партнером, который присоединился к новому проекту SIMULIA, в рамках которого и на базе конечно-элементного комплекса ABAQUS фирма Dassault Systemes намерена разработать и создать многодисциплинарную расчетную среду нового поколения, тесно интегрированную с архитектурой CATIA v5. Приложение LMS Virtual.Lab, уже работающее в среде CATIA v5, рассматривается как один из возможных компонентов для среды SIMULIA.

SIMULIA — это открытая универсальная многодисциплинарная расчетная среда от компании Dassault Systemes, которая позволит проводить численное моделирование разрабатываемых изделий максимально приближенно к реальности. SIMULIA будет опираться на самые мощные и передовые расчетные технологии для виртуального прототипирования, что позволит значительно сократить время и снизить стоимость проектирования новой продукции (www.simulia.com).

LMS Virtual.Lab широко используется различными компаниями во всем мире для численного моделирования эксплуатационных характеристик создаваемых изделий. Стратегия развития системы LMS Virtual.Lab построена на кооперации между Dassault Systemes и LMS International, начавшейся в 2002 году с адаптации программных продуктов LMS под требования среды CATIA v5. Программные продукты LMS Virtual.Lab включают средства моделирования структурной динамики, шума и вибрации, акустического излучения, кинематики многокомпонентных систем, оценки надежности и долговечности изделий. Программные продукты LMS Virtual.Lab широко применяют такие известные компании, как Airbus, BMW, Boeing, Embraer, Ford, GM, Honda, Mitsubishi и др.

Компания «ТЕСИС» является официальным дистрибьютором программных комплексов ABAQUS и LMS Virtual.Lab на территории России, Украины и Белоруссии. Наряду с лучшими в своих областях программными продуктами ведущих фирм мира, компания «ТЕСИС» предлагает и собственные программные продукты, отличающиеся новизной и высоким уровнем исполнения. Подобная интеграция позволяет «ТЕСИС» предлагать уникальные решения для широкого круга заказчиков из различных отраслей промышленности.