

DOI: 10.18721/JPM.12315  
УДК 534

## **ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

**В.С. Модестов**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрены вопросы обоснования прочности ответственных железобетонных конструкций при экстремальных механических воздействиях. Главное внимание уделяется взаимодействию внешней защитной оболочки конструкции с тяжелым самолетом. Используются современные физические модели и методы непосредственного численного моделирования процессов с учетом нелинейного поведения материалов. Эти подходы верифицируются на оригинальных модельных задачах. Определяется воздействие тяжелого транспортного самолета на недеформированную железобетонную стену. Варьируются значения толщины внешней защитной оболочки реакторного здания. Исследуется прочность конструкций с учетом податливости грунтовых оснований, на которых расположены железобетонные сооружения.

**Ключевые слова:** прочность железобетонной конструкции, экстремальное механическое воздействие, железобетон, метод конечных элементов

**Ссылка при цитировании:** Модестов В.С. Прочность железобетонных конструкций при экстремальных механических воздействиях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 3. С. 177–187. DOI: 10.18721/JPM.12315

## **STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES UNDER EXTREME MECHANICAL IMPACTS**

**V.S. Modestov**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

The article deals with feasibility studies of the strength of reinforced concrete structures under extreme mechanical impacts. The focus is on the interaction of the structure's outer containment with a heavy aircraft. Modern physical models and methods of direct numerical simulation of processes are used with taking into account nonlinear behavior of materials. These approaches are verified on original model problems. The impact of a heavy transport aircraft on an undeformed reinforced concrete wall is determined. The thickness values of the outer containment of the reactor building are varied. The strength of structures with taking into account the pliability of soil bases on which reinforced concrete structures are located is also studied.

**Keywords:** structural strength, extreme mechanical impact, ferroconcrete, finite element method

**Citation:** Modestov V.S., Strength of reinforced concrete structures under extreme mechanical impacts, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (3) (2019) 177–187. DOI: 10.18721/JPM.12315

## Введение

Гарантия сохранения безопасности при любых нормальных и аварийных режимах работы – это важнейшее требование, предъявляемое к эксплуатации промышленных и гражданских объектов. К объектам же атомной энергетики, для которых выполнение дополнительных условий по ядерной и радиационной безопасности является обязательным, предъявляются особые, повышенные требования. В связи с этим выдвигается важный вопрос о расчетном обосновании прочности железобетонных конструкций при экстремальных механических воздействиях. К таким воздействиям относятся как атмосферные вихри (торнадо, смерч, ураган), так и техногенные катастрофы (обрушение тяжелой конструкции, падение самолета и т. п.). Особую опасность представляет падение самолета на защитную оболочку реактора атомной электростанции (АЭС).

Вопросам поведения железобетонных конструкций при экстремальных механических воздействиях посвящено большое количество публикаций. Центральное место по решению этой проблемы в российской научной литературе принадлежит, безусловно, работам А.Н. Бирбраера, А.Ю. Роледера [1, 2] и Н.А. Волкодава [3]. Учет деформируемости преграды при воздействии на нее летящего объекта выполнен Н.А. Волкодавом с помощью квазистатических методов с введением коэффициента динамичности; последний показывает, насколько динамическая нагрузка на преграду превышает статическую. В итоге разработки вязкопластической модели соударяющихся тел, этим автором было получено классическое выражение для нагрузки на неподвижную преграду со стороны самолета в процессе его разрушения – так называемая формула Риеры [4].

К сожалению, подавляющее большинство работ на данную тему содержит в своей основе весьма серьезные, но не всегда достаточно обоснованные допущения и ограничения. Более того, применяемые расчетные методики обычно носят инженерный характер. Расчеты железобетонных конструкций проводят, как правило, с помощью линейных методов определения напряженно-деформированного состояния. При этом сначала оценивается состояние бетона, и лишь затем подбирается армирование конструкции. Данный способ ока-

зывается непригодным для оценки напряженно-деформированного состояния железобетона при экстремальных воздействиях, когда значительное влияние начинают оказывать нелинейные локальные напряжения и деформации в областях взаимодействия бетона с железной арматурой. В литературе, по сути дела, отсутствует решение задачи в такой постановке.

В настоящей статье предлагается обоснование для гарантии прочности железобетонных конструкций при экстремальных механических воздействиях с использованием современных физических моделей и методов непосредственного численного моделирования процессов. При этом учитываются нелинейное поведение материалов и податливость грунтовых оснований, на которых расположены железобетонные сооружения.

## Методы и алгоритмы исследования экстремальных механических воздействий

Для численного моделирования поведения железобетонных конструкций при экстремальных механических воздействиях разработано большое количество методов, учитывающих в той или иной мере нелинейные физико-механические свойства бетона и арматуры. Как правило, в разнообразных моделях реализован универсальный подход к описанию нелинейных прочностных свойств бетона (нелинейные свойства – когда бетонная матрица переходит из упругого состояния в пластическую стадию) с помощью критерия текучести  $F_f$ :

$$\sqrt{I_2} = F_f(I_1, \theta, \mathbf{k}), \quad (1)$$

где

$$I_1 = 3p = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3,$$

$$I_2 = \frac{1}{2} \text{tr}(S^2), I_3 = \frac{1}{3} \text{tr}(S^3)$$

– инварианты тензора напряжений ( $\sigma_i$  – элементы тензора напряжений  $\sigma$ ),  $p$  – среднее нормальное напряжение);  $\mathbf{k}$  – вектор внутренних переменных материала;  $\theta$  – инвариант Лоде (координата цилиндрической системы координат Лоде); в формуле для  $I_2$  величина  $S$  – девиатор тензора напряжений,

$$S = \sigma - pE$$

( $E$  – единичный тензор).

Практически во всех моделях железобетона есть возможность учесть наличие арматуры. При этом используются различные



методики: от добавления распределенной «жесткости» в направлениях армирования до прямого моделирования отдельных стержней арматуры, арматурной сетки и т. п.

С позиций механики, особенности матрицы композитного материала, состоящей из бетона, в основном выражаются через следующие характеристики:

нелинейная диаграмма деформирования; различные модули Юнга на сжатие и растяжение; при этом предел прочности при растяжении в десятки раз ниже, чем предел прочности при сжатии;

способность к трещинообразованию и, как следствие, – деформационная анизотропия, образование и рост трещин в областях контакта бетонной матрицы с арматурой.

Для учета этих особенностей в настоящей работе использована модель CDP (Concrete Damage Plasticity), которая обеспечивает возможности моделирования свойств бетона и других квазихрупких материалов во всех типах конструкций (стержневые, оболочечные и объемные). Эта модель основана на описании упругопластических свойств бетона и учитывает его повреждаемость и различную работу на растяжение и сжатие. CDP-модель можно использовать и для простого бетона, но прежде всего она предназначена для анализа железобетонных конструкций. В конечно-элементную модель исследуемого материала можно добавлять элементы, моделирующие арматуру. Эта модель предназначена для расчета конструкций под действием монотонных, циклических и динамических нагрузок. При использовании модели комбинируется неассоциированный закон пластического течения с закономерностями упрочнения и упругого деформирования с необратимой повреждаемостью, что дает возможность смоделировать процесс трещинообразования. Удобство использованной CDP-модели состоит также в том, что она позволяет учитывать восстановление жесткости бетона при действии циклических знакопеременных нагрузок и в ней возможен учет зависимости свойств материала от скорости деформирования.

Бетон принимается линейно-упругим при растяжении, вплоть до достижения величины напряжения, равной пределу прочности на растяжение, что соответствует началу образования микротрещин в материале. Поведение бетона после достижения

предела прочности на растяжение описывается с помощью ниспадающей ветви диаграммы деформирования и приводит к локализации напряжений в конструкции. При одноосном сжатии для бетона характерно линейное поведение до достижения предела текучести. Пластическая фаза деформирования характеризуется участком упрочнения вплоть до достижения предела прочности на сжатие с последующим ниспадающим участком диаграммы. Диаграммы деформирования приведены в статье [5] и описывают основные особенности работы неармированного бетона.

Армирование бетонных сооружений, как правило, моделируется с помощью специальных стержневых элементов, которые могут определяться по отдельности или ориентированными слоями. Для стали арматуры обычно используется упругопластическая модель деформирования материала. Эффекты, связанные с взаимодействием бетона и арматуры, такие как проскальзывание или нагельный эффект, моделируются приближенно путем внесения изменений в зависимость «напряжение – деформация» для бетона с целью учета передачи напряжений в бетоне с трещиной посредством арматуры.

#### **Разработка и апробация методики расчета железобетонных конструкций с учетом нелинейного поведения материалов**

Описанные выше, а также представленные в работах [5 – 15] методики и алгоритмы в дальнейшем применялись нами для расчета железобетонных конструкций при экстремальных механических воздействиях.

Как уже отмечалось выше, в конечно-элементных расчетах, наряду с прямым объемным моделированием стержней арматуры, известны и другие способы моделирования арматуры в бетоне. В частности, применяются такие модели, как дискретная, встроенная и распределенная.

В дискретной модели узлы стержневых элементов для арматуры совпадают с узлами объемной конечно-элементной сетки для бетона.

Во встроенной модели узлы сеток арматуры и бетона не совпадают, но связаны уравнениями совместности.

Наконец, в распределенной модели предполагается, что арматура равномерно распределена по элементам конечно-элементной сетки для бетона.

При использовании программной си-

стемы ABAQUS мы применяли методики встроенного и распределенного армирования. При этом выполнялось сравнение результатов расчетов по двум указанным методикам моделирования арматуры при решении задачи о статическом нагружении железобетонной балки. Такой анализ показал, что полученные значения напряжений в конкретной точке конструкции и энергии деформации как для встроенного, так и для распределенного армирования совпадают с точностью, достаточной для инженерных расчетов.

Рассмотрение аналогичной модельной задачи о динамическом нагружении железобетонной плиты с петлевым армированием («стыками Передерия») привело к заключению, что определяющим фактором, влияющим на несущую способность подобных конструкций, выступает возникновение радиально расположенных трещин по контуру петлевых стыков, а не первичных трещин на нижней грани плиты под областями приложения нагрузки, как это случается при простом продольном армировании. Математическое моделирование предсказало возникновение диагональных трещин в горизонтальной плоскости между соседними петлевыми стыками. Кроме того, было получено подтверждение выдвинутого предположения о том, что наличие поперечной арматуры внутри петлевых стыков («замковой арматуры») положительно (и существенно) влияет на несущую способность железобетонных плит и, в частности,

отодвигает процесс трещинообразования.

Апробация применяемой методики производилась нами также на модельной задаче о взаимодействии железобетонной плиты с деформируемым металлическим ударником. При этом армирование плиты задавалось как явным моделированием стержней арматуры балочными элементами, так и с помощью технологии распределенного армирования программной системы ABAQUS.

Расчеты показали, что распределение параметра поврежденности бетона  $d$  для двух моделей армирования (стержневого и распределенного) дают качественно аналогичные результаты. С другой стороны, эквивалентные по Мизесу напряжения в стержнях арматуры для модели распределенного армирования, как и ожидалось, дают «размазанную» картину, по сравнению с моделью стержневого армирования (рис. 1). Кроме того, значения эквивалентных напряжений по Мизесу для модели распределенного армирования оказываются меньше, чем в случае модели стержневого армирования. Расчеты также показали, что зависимости от времени величины компоненты  $R_z$  главного вектора сил реакции плиты, а также компоненты  $u_z$  вектора перемещений для центрального узла на тыльной поверхности плиты, практически полностью совпадают для двух моделей армирования. Данное обстоятельство позволило использовать в последующих расчетах модель распределенного армирования в местах, далеких от места удара, как наименее трудоемкую.

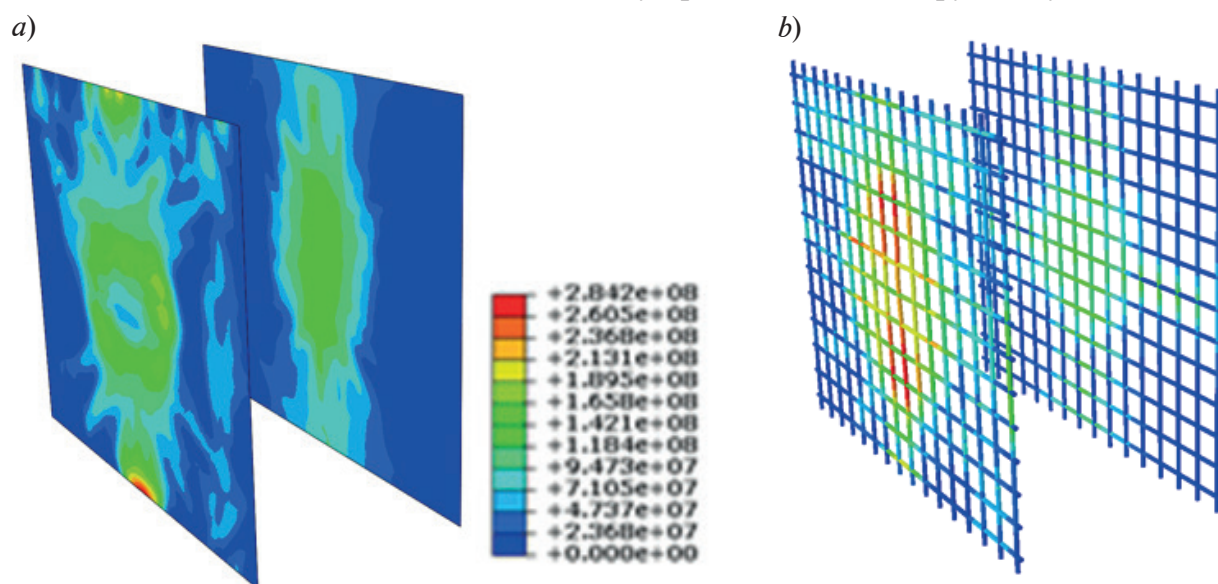


Рис. 1. Поле эквивалентных по Мизесу напряжений в стержнях арматуры по двум моделям армирования: распределенной (а) и стержневой (б)



В рамках исследуемой задачи о проби-вании железобетонной плиты деформируемым металлическим ударником было рассмотрено применение расширенной модели Друккера – Прагера, допускающую задание нескольких критериев прогрессирующего повреждения и разрушения материала, и применение так называемой функции «удаления элементов». В терминах метода конечных элементов эта функция позволяет последовательно выключать из расчетной модели те элементы, в которых некоторая мера поврежденности превышает заданную величину.

### **Моделирование процесса соударения самолета с недеформируемой железобетонной плитой**

С помощью методики, описанной в предыдущем разделе, мы выполнили численное моделирование процесса столкновения крупнофюзеляжного самолета с недеформируемой железобетонной плитой.

При решении данной задачи нагрузка на неподвижную преграду со стороны самолета в процессе его разрушения определялась по формуле, предложенной Дж.Д. Риерой [4]:

$$R(t) = P[\xi(t)] + \dot{\xi}^2(t) \mu[\xi(t)]. \quad (2)$$

При этом модель самолета представляла собой жесткопластический стержень с погонной массой  $\mu(\xi)$  и предельной нагрузкой  $P(\xi)$ , которые распределены по длине  $\xi$ . Для распределений  $\mu(\xi)$  и  $P(\xi)$  использовались известные из литературы данные по самолету Boeing 707. Соответствующие зависимости для крупнофюзеляжных самолетов Boeing 737, Boeing 747, Airbus A380 определялись масштабированием. Предполагалось, что неподвижная преграда изготовлена из бетона марки В40, а физико-механические свойства арматуры соответствуют нормативам для стали А400. При моделировании процесса столкновения для материалов арматуры и самолета использовалась классическая упругопластическая модель Мизеса с изотропным упрочнением.

В данной работе за основу геометрической модели крупнофюзеляжного пассажирского самолета были приняты имеющиеся в открытом доступе чертежи и САД-модели самолета Airbus A380. Была построена конечно-элементная модель самолета, содержащая 72 354 линейных оболочечных трех- и четырехузловых элемента, которые

обеспечивали 434 124 степеней свободы.

Было выполнено сравнительное исследование процесса столкновения крупнофюзеляжного самолета Airbus A380 с недеформируемой преградой с применением упрощенного аналитического метода Риеры и прямого численного динамического расчета методом конечных элементов по применяемой нами методике. Скорость самолета при столкновении с преградой была принята равной 110 м/с. Столкновение рассматривалось при нулевых значениях углов тангажа, рыскания и крена самолета.

На рис. 2 показано смоделированное разрушение самолета при столкновении с недеформируемой преградой в момент времени  $t = 0,5$  с. В процессе расчета вычислялась сила реакции связи недеформируемой преграды, значение которой сравнивалось с решением по методу Риеры [4].

На рис. 3 приведено сравнение численного и аналитического решений для силы реакции железобетонной преграды. Анализ этих данных выявляет ожидаемые качественные различия в формах зависимости силы реакции от времени. Задание нагрузки по методу Риеры приводит к гладкому решению, а использование конечно-элементной модели – к двум численным экстремумам.

Первый экстремум на рис. 3 соответствует моменту контакта крыльев самолета с преградой, второй – моменту удара двигателей. Нужно отметить, что максимальное значение силы реакции в численном расчете составляет 2,25 МН, а в приближенном расчете по методу Риеры – 1,7 МН.

Таким образом, проведенный анализ результатов обосновывает применимость разработанной конечно-элементной модели самолета к расчету процесса его столкновения с сооружениями АЭС.

### **Моделирование процесса соударения самолета с конструкцией реакторного здания АЭС**

При столкновении самолета с промышленным сооружением, в частности с реакторным зданием АЭС, возникают экстремальные нагрузки на эти сооружения [1]. Поэтому необходимо проверять не только прочность отдельных конструкций, но также прочность и устойчивость как здания в целом, так и его фундаментов.

Экстремальные механические воздействия имеют ярко выраженный динамиче-



Рис. 2. Разрушение самолета при столкновении с недеформируемой преградой в момент времени  $t = 0,5$  с, полученное методом конечных элементов

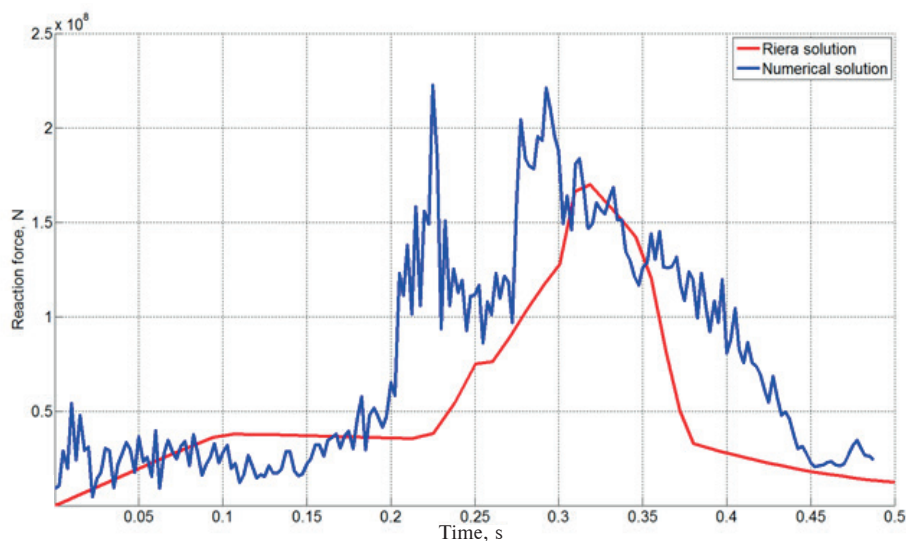


Рис. 3. Сравнение аналитического и численного решений для зависимости силы реакции железобетонной преграды от времени при столкновении с ней самолета

ский характер, поэтому расчет прочности при создаваемых ими нагрузках должен производиться либо динамическими методами, либо на квазистатическую нагрузку, найденную с использованием коэффициента динамичности.

С использованием описанного выше метода было выполнено численное моделирование процесса соударения самолета с конструкцией реакторного здания АЭС с учетом нелинейного поведения материалов.

В ходе решения задачи были разработаны геометрическая и конечно-элементная модели комплекса, включающие модели реакторного здания АЭС и здания безопасности, а также модели паровой камеры. Все эти модели соответствовали проектной документации типовой АЭС. Считалось, что здания безопасности и паровой камеры выполнены из оболочечных элемен-

тов линейно-упругой модели материала с заданными свойствами, эквивалентными нормативным свойствам бетона В40. Между защитной оболочкой здания реактора и зданиями безопасности и паровой камеры задавались условия контактного взаимодействия. Предполагалось, что защитная оболочка состоит из внешней и внутренней частей. В зоне ожидаемых наибольших деформаций было выполнено сгущение конечно-элементной сетки.

В рамках конечно-элементной модели здания реактора рассматривалось три модели материала:

линейная, со свойствами бетона В40 (модель 1);

нелинейная, для материала типа CDP, или Друккера – Прагера, со свойствами бетона В40 (модель 2);

та же, что модель 2, но со свойствами



бетона В60 (модель 3).

Для арматуры использовалась упругопластическая модель материала со свойствами арматурной стали А400. Общее число узлов конечно-элементной модели реакторного здания составляло 1 373 769, число степеней свободы – 4 221 307.

Численное моделирование поставленной задачи производилось в широком диапазоне значений толщины  $T$  внешней защитной оболочки: от 0,6 до 2,5 м.

На рис. 4 показано распределение параметра поврежденности бетона  $d_i$  в реакторном здании в результате столкновения с самолетом для различных значений толщины  $T$ .

Анализ данных на рис. 4 приводит к выводу, что в результате такого столкновения на внешней защитной оболочке будут образовываться магистральные трещины в меридиональном направлении при всех значениях толщины стенки, кроме  $T = 2,5$  м. Если  $T = 0,6$  м, то образующиеся трещины пронизывают практически всю поверхность защитной оболочки (за исключением купола и области вблизи фундамента). С ростом толщины оболочки размеры пораженной области уменьшаются, и при  $T = 2,5$  м область повреждений носит локальный характер, по своим контурам повторяющий падающий самолет. При этом можно отметить во всех случаях возникновение маги-

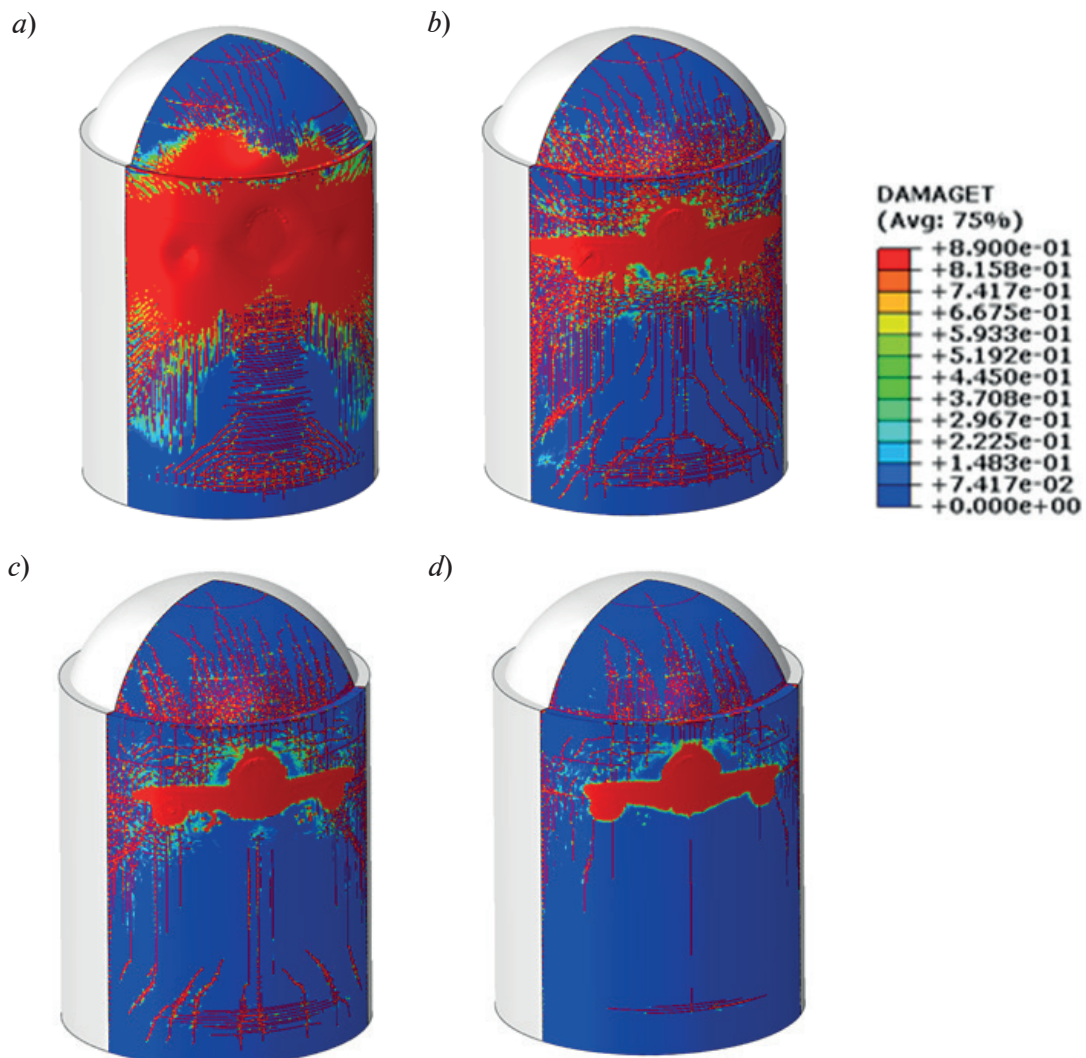


Рис. 4. Распределение параметра поврежденности бетона  $d_i$  (%) на внешней защитной оболочке реактора АЭС для различных значений толщины  $T$ , м: 0,6 (a), 1,5 (b), 2,0 (c), 2,5 (d)

стральных трещин в кольцевом направлении внешней защитной оболочки.

Расчеты показали, что при толщине внешней защитной оболочки, равной 0,6 м, отмечаются максимальные значения вектора перемещений ее точек, которые составляют примерно 1,8 м. Они являются катастрофическими, разрушительными для защитной оболочки. Отсюда следует, что при заданных параметрах соударения самолета с защитной оболочкой ее толщина  $T = 0,6$  м является недопустимой. Можно утверждать, что, в соответствии с требованиями норм и на основании приведенных результатов моделирования, минимально допустимая толщина внешней защитной оболочки составляет 1,5 м.

#### Расчет процесса соударения самолета с реакторным зданием АЭС с учетом податливости грунтового основания

При построении алгоритма решения данной задачи моделирование грунтового основания осуществлялось с помощью упрощенного подхода, состоящего в замене пространственной модели грунта эквивалентными пружинами и демпферами, связанными с узлами конечно-элементной сетки фундамента здания. Была принята как модель абсолютно жесткого фундамента, так и упрощенная модель деформируемого фундамента с использованием упругодемпферных элементов. При этом величины эквивалентных жесткостей и демпфирований грунтового основания определялись как по

формулам стандарта ASCE, так и по формулам стандарта NIST.

В дальнейшем, в качестве исследуемой задачи, рассматривался удар самолета о цилиндрическую оболочку, геометрия которой приблизительно соответствует внешней защитной оболочке реакторного здания АЭС. Расчет проводился в программной системе ABAQUS/EXPLICIT. Количество конечных элементов было равно 17 613.

На рис. 5 приведены полученные расчетные зависимости от времени перемещений точки по поверхности защитной оболочки вблизи пятна удара в направлении оси  $Ox$ . Можно отметить существенное различие в решениях для модели абсолютно жесткого основания и упрощенной модели податливого основания. В то же время расчеты по стандартам ASCE и NIST дали достаточно близкие результаты.

Представленные данные расчетов говорят о существенном различии для случаев использования алгоритма учета податливости грунта (стандарты ASCE и NIST) и алгоритма жесткого основания (учет податливости грунта отключен).

Этот результат подчеркивает важность учета податливости грунтового основания при построении методики расчета процесса взаимодействия самолета с реакторным зданием АЭС.

#### Заключение

Проведено исследование прочности железобетонных конструкций при экстре-

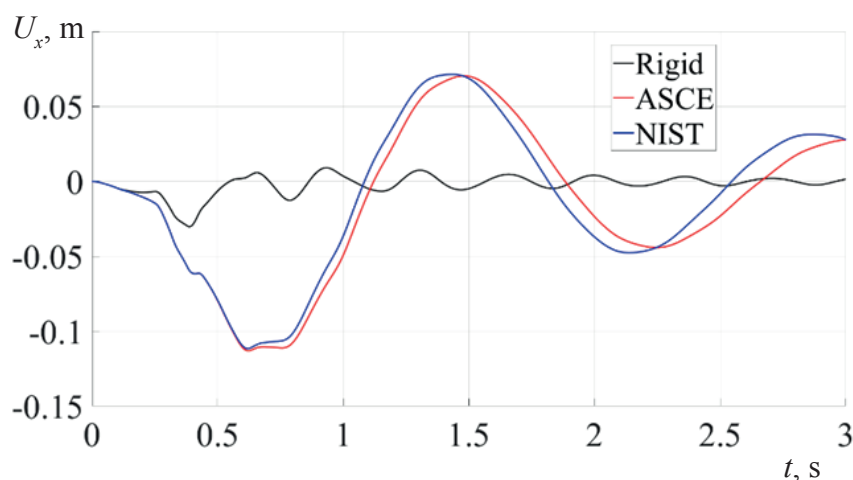


Рис. 5. Перемещения точки в защитной оболочке реакторного здания АЭС вблизи пятна удара, в направлении оси  $O_x$ . Результаты моделирования для абсолютно жесткого основания и для податливого основания по стандартам ASCE и NIST





мальных механических воздействиях. При этом достигнуты следующие результаты.

1. Разработана методика моделирования и решена задача об ударном взаимодействии железобетонной плиты с деформируемым металлическим ударником; при этом использована программная система ABAQUS для учета встроенного и распределенного армирования.

2. Получены результаты сравнительного исследования процесса взаимодействия самолета Airbus A380 с недеформируемой преградой с применением прямого численного динамического расчета методом конечных элементов и с применением упрощенного метода Риеры. Установлено существование двух экстремумов на зависимости реакции связи преграды от времени: в момент контакта крыльев самолета с преградой и в момент удара двигателей о

препятствие.

3. Разработаны конечно-элементные модели комплекса АЭС, состоящего из реакторного здания, здания безопасности и паровой камеры, на основе проектной документации типовой АЭС.

4. Получены результаты численного моделирования процесса взаимодействия самолета с конструкцией реакторного здания АЭС на основе верифицированных в работе методик расчета, учитывающих нелинейное поведение материалов. Установлено, что минимально допустимая толщина внешней защитной оболочки АЭС для принятой модели составляет 1,5 м.

5. Разработана методика и получены результаты расчетов процесса соударения самолета с реакторным зданием АЭС с учетом податливости грунта, на котором оно построено.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2009. 594 с.

2. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998. 255 с.

3. Волкодав И.А. Методика оценки безопасности АЭС при ударах разрушающихся объектов. Дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 174 с.

4. Riera J.D. On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces // Nuclear Engineering and Design. 1968. Vol. 8. No. 4. Pp. 415–426.

5. Лукин А.В., Модестов В.С. Конечно-элементное моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2014. № 3 (201). С. 35–46.

6. Боровков А.И., Войнов И.Б., Лобачев А.М. и др. Расчетное обоснование безопасности корпуса реакторного блока при сейсмическом воздействии // Приложение к журналу «Безопасность жизнедеятельности». 2014. № 5. С. 8–12.

7. Боровков А.И., Модестов В.С., Пальмов В.А. Анализ пространственного напряженно-деформированного состояния трубных решеток методами механики композитных материалов // Научно-технические ведомости

СПбГПУ. Основной выпуск. 2008. № 4 (63). С. 37–45.

8. Пивков А.В., Лобачев А.М., Полянский В.А., Модестов В.С. Численное моделирование ультразвуковых волн в упругом изотропном слое с пьезоэлектрическим актуатором // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2016. № 4 (253). С. 150–162.

9. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G., Beliaev M.O., Modestov V.S. Methods of identification of concrete elastic-plastic-damage models // Magazine of Civil Engineering. 2017. Vol. 76. No. 8. Pp. 279–297.

10. Fedorenko R.V., Kudryavtsev A.A., Lukin A.V., Modestov V.S., Murtazin I.R. Strength analysis of nuclear power plant structures in case of aircraft crash impact // Procedia Structural Integrity. 2017. Vol. 6. Pp. 244–251.

11. Лукин А.В., Модестов В.С., Смирнов А.Б., Юрченко Д.А. Анализ прочности и расчетно-экспериментальная верификация численных моделей железобетона за пределами упругих деформаций, применяемых в реакторной установке и элементах, важных для безопасности // Сборник трудов Десятой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2016). Москва, 25–27 мая 2016. М., 2016. С. 594–598.

12. Лукин А.В., Кудрявцев А.А., Модестов В.С., Муртазин И.Р., Федоренко Р.В. Оценка прочности строительных конструкций АЭС при падении тяжелого коммерческого самолета с учетом нелинейной работы конструкций // Сборник трудов Одиннадцатой международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2018). Москва, 23–24 мая 2018 г. М., 2018. С. 558–564.

13. Буторин С.Л., Шульман Г.С., Шульман С.Г. Методы анализа безопасности АЭС при авиакатастрофах. М.: Энергоатомиздат, 2006. 326 с.

14. Лаврова В.А., Лукин А.В., Модестов В.С., Федоренко Р.В., Кудрявцев А.А., Муртазин И.Р., Филимохина А.И. Исследование напряженно-деформированного состояния осо-

бо опасных сооружений при падении тяжелого самолета // Сборник трудов конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». 21–24 мая 2019 г. Подольск: ОАО ОКБ «Гидропресс», 2019. [http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk\\_2019/documents/mntk2019-110.pdf](http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk_2019/documents/mntk2019-110.pdf)

15. Лаврова В.А., Лукин А.В., Модестов В.С., Федоренко Р.В., Кудрявцев А.А., Муртазин И.Р. Обоснование использования программной системы АВАQUS для выполнения проектных и эксплуатационных расчетов // Сборник трудов конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». 21–24 мая 2019 г. ОАО ОКБ «Гидропресс», Подольск: ОАО ОКБ «Гидропресс», 2019. [http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk\\_2019/documents/mntk2019-110.pdf](http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk_2019/documents/mntk2019-110.pdf)

*Статья поступила в редакцию 10.06.2019, принята к публикации 19.08.2019.*

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**МОДЕСТОВ Виктор Сергеевич** – директор центра «Техническая диагностика и надежность АЭС и ТЭС» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
vmodestov@spbstu.ru

#### REFERENCES

1. Birbrayer A.N., Roleder A.Yu., Ekstremalnyye vozdeystviya na sooruzheniya [Storm actions on arrangements], Polytechnical Institute Publishing, St. Petersburg, 2009.

2. Birbrayer A.N., Raschet konstruksiy na seysmostoykost [An analysis of structures for seismic stability], Nauka, St. Petersburg, 1998.

3. Volkodav I.A., Metodika otsenki bezopasnosti AES pri udarakh razrushayushchikhsya obyektov [AES safety assessment principles for impacts of objects' failure], Ph.D. Thesis, St. Petersburg, 2011.

4. Riera J.D., On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces, Nuclear Engineering and Design. 8 (4) (1968) 415–426.

5. Lukin A.V., Modestov V.S., Finite element modeling and an analysis of the stress-strain state of reinforced concrete structures, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. (3(201)) (2014) 35–46.

6. Borovkov A.I., Voynov I.B., Lobachev A.M., et al., Raschetnoye obosnovaniye bezopasnosti korpusa reaktornogo bloka pri seysmicheskom vozdeystvii [The feasibility study of a reactor housing safety under seismic impact], Supplement

to the “Life Safety” Journal (Bezopasnost' Zhiznedatel'nosti). (5) (2014) 8–12.

7. Borovkov A.I., Modestov V.S., Pal'mov V.A., 3D analysis of stress-strain state of tube plates by methods of composite materials mechanics, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. (4 (63)) (2008) 37–45.

8. Pivkov A.V., Lobachev A.M., Polyanskiy V.A., Modestov V.S., Numerical simulation of ultrasonic waves in the isotropic elastic layer with the piezoelectric actuator, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. (4 (253)) (2016) 150–162.

9. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G., et al., Methods of identification of concrete elastic-plastic-damage models, Magazine of Civil Engineering. 76 (8) (2017) 279–297.

10. Fedorenko R.V., Kudryavtsev A.A., Lukin A.V., et al., Strength analysis of nuclear power plant structures in case of aircraft crash impact, Procedia Structural Integrity. 6 (2017) 244–251.

11. Modestov V.S., Lukin A.V., Smirnov A.B., et al., Strength analysis and computational-experimental verification of reinforced concrete computational models beyond elastic deformations



used in BREST OD-300 reactor and safety-related components, Proc. of the Tenth International Scientific and Technical Conference “Efficiency and economics of nuclear power industry” (MNTK-2016), Moscow, May 25–27, 2016, Pp. 594–598.

12. **Lukin A.V., Kudryavtsev A.A., Modestov V.S., et al.**, Otsenka prochnosti stroitelnykh konstruktsiy AES pri padenii tyazhelogo kommercheskogo samoleta s uchetom nelineynoy raboty konstruktsiy [AES structural strength assessment when a heavy commercial aircraft crashes taking into account the nonlinear construction work], Proc. of the Eleventh International Scientific and Technical Conference “Efficiency and economics of nuclear power industry” (MNTK-2018), Moscow, May 23–24, 2018, Pp. 558–564.

13. **Butorin S.L., Shulman G.S., Shulman S.G.**, Metody analiza bezopasnosti AES pri aviakatastrofakh [Analysis methods for AES safety in the plane crashes], Energoatomizdat,

Moscow, 2006.

14. **Lavrova V.A., Lukin A.V., Modestov V.S., et al.**, Issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osobo opasnykh sooruzheniy pri padenii tyazhelogo samoleta [Stress-strain state study of especially dangerous buildings when a heavy plane crashes], Proc. of “The Security of AES with PWR” Conference, May 21–24, 2019, “Gidropress”, Podolsk, 2019. [http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk\\_2019/documents/mntk2019-110.pdf](http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk_2019/documents/mntk2019-110.pdf)

15. **Lavrova V.A., Lukin A.V., Modestov V.S., et al.**, Obosnovaniye ispolzovaniya programmnoy sistemy ABAQUS dlya vypolneniya proyektnykh i ekspluatatsionnykh raschetov [The feasibility study of using the ABAQUS software for design and experimental calculations], Proc. of “The Security of AES with PWR” Conference, May 21–24, 2019, “Gidropress”, Podolsk, 2019. [http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2019/documents/mntk\\_2019-110.pdf](http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2019/documents/mntk_2019-110.pdf)

*Received 10.06.2019, accepted 19.08.2019.*

#### THE AUTHOR

**MODESTOV Victor S.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

[vmodestov@spbstu.ru](mailto:vmodestov@spbstu.ru)