

УДК 544.45+69.04+004.942

Антон Федорович СМАЛЮК,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории динамики систем и механики
материалов Белорусского национального
технического университета

Игорь Александрович МИКЛАШЕВИЧ,
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией
динамики систем и механики материалов
Белорусского национального
технического университета

Геннадий Васильевич СМЕРНОВ,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник ОХСП НИИ
импульсных процессов
ГУ "Институт порошковой металлургии"

Игорь Васильевич ПЕТРОВ,
заведующий лабораторией ОХСП НИИ
импульсных процессов ГУ "Институт
порошковой металлургии"

Олег Антонович ДЗИЧКОВСКИЙ,
главный научный сотрудник ОХСП НИИ
импульсных процессов ГУ "Институт
порошковой металлургии"

ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ПОДХОД К КОМПЬЮТЕРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЗДАНИЙ

HIERARCHICAL APPROACH TO COMPUTER MODELING OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS PROGRESSIVE DESTRUCTION

Рассмотрена возможность моделирования взрывного разрушения зданий и сооружений средствами конечно-элементного пакета LS-DYNA. Рассмотрены иерархические уровни построения модели. Предложена методика моделирования закладных и несущих элементов конструкции. Исследован вопрос возникновения прогрессирующего обрушения. Показано, что существует возможность замены при моделировании процесса взрыва искусственным удалением опорных элементов конструкции. Проведено сравнение с реальными данными по взрывному демонтажу конструкции, показана достаточно хорошая согласованность.

The possibility of the explosive destruction buildings modeling by means of finite element package LS-DYNA is investigated. We consider the hierarchical levels of model building. A method of modeling the hidden (inner) and supporting structural elements of the construction is proposed. We study the problem of progressive collapse. It is shown that there is the possibility of replacing the modeling process of the explosion artificially removing the supporting elements of the structure. A comparison with real data on the structure explosive demolition shown quite good agreement.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием урбанистического окружения, необходимостью повторного использования территорий и, как следствие, сноса зданий и повторного строительства в условиях стесненной городской застройки в настоящее время компьютерное моделирование разрушения зданий и сооружений привлекает повышенное внимание. Особенный интерес проявляется к так называемому прогрессирующему разрушению, при котором небольшие в сравнении с общим размером конструкции разрушения приводят к разрушению всего здания или его значительной части [1].

Интерес к этому процессу обострился после 11 сентября 2001 года, когда достаточно локальные повреждения привели к полному разрушению двух небоскребов в Нью-Йорке [2]. Учитывая достаточно высокий риск террористических атак в современном мире, исследования в данной области не теряют своей важности [3]. Впрочем, прогрессирующее разрушение может возникнуть и в случае чрезвычайных ситуаций и аварий, имеющих нетеррористический характер. Например, достаточно распространен взрыв бытового газа в жилых помещениях.

Особый интерес к моделированию прогрессирующего разрушения проявляется при взрывном демонтаже зданий и сооружений. Как правило, именно управляемое прогрессирующее разрушение применяется, если необходимо снести большую постройку. При этом процесс обрушения вызывается не столько

общим воздействием взрывной волны (как правило, действующей в локально-ограниченной области), как последующим развитием процессов катастрофического разрушения конструкций под действием силы тяжести. Так как при демонтаже в условиях интенсивной городской или промышленной застройки чаще всего существуют ограничения в виде других зданий и коммуникаций, которые нельзя повредить, моделирование поведения конструкции в ходе разрушения является важным при выборе соответствующей технологии проведения взрывных работ.

На практике при компьютерном моделировании поведения здания могут быть проведены два вида расчетов: статические и динамические. Статические конечно-элементные расчеты являются достаточно обычным инструментом при разработке конструкторской документации на проектирование здания. Они наименее затратны с точки зрения вычислительных мощностей и предъявляют меньшие требования к качеству модели. Известным инструментом в строительной и конструкторской практике является многофункциональный программный комплекс для статического расчета, исследования и проектирования конструкций различного назначения "Лира".

Статические методы имеют одно существенное ограничение: они могут с некоторой точностью указать, начнется ли прогрессирующее обрушение, но с их помощью затруднительно предсказать полный характер всего процесса, что может быть чрезвычайно важно для ряда задач. В частности, с их помощью очень сложно

предсказать, как будут взаимодействовать отдельные элементы конструкции в процессе разрушения.

Динамические расчеты дают значительно более полный и точный результат по всему процессу, вплоть до возможности предсказания характера разлета обломков конструкции, что является чрезвычайно важным, например, для моделирования сноса здания. Главным недостатком динамических методов расчета является то, что они требуют более высокого качества подготовки конечно-элементной модели, значительных вычислительных мощностей и большего времени на выполнение расчета. Кроме того, исследование динамики разрушения требует более аккуратного подхода к формулировке граничных и начальных условий, выбору системы определяющих уравнений, и, как следствие, повышенные требования к квалификации персонала.

Но, несмотря на высокие требования, динамические методы расчета являются единственным способом узнать не только, обрушится ли здание, но и как оно будет разрушаться.

ТЕХНОЛОГИИ, ИСПОЛЗУЕМЫЕ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ЗДАНИЙ

Наиболее развитым на сегодняшний день методом для моделирования быстропротекающих динамических процессов, включая разрушение, является метод конечных элементов. Существует немалое количество готовых программных продуктов, позволяющих моделировать процессы взрыва и разрушения. Самым распространенным из них универсального назначения является LS-DYNA. Этот пакет позволяет решать широкий спектр задач, обладает чрезвычайно обширной базой моделей материалов, включая многие материалы, используемые в строительстве. Пакет хорошо зарекомендовал себя при решении ответственных задач.

К недостаткам данного программного продукта следует отнести значительную ресурсоемкость, достаточно сложный интерфейс, в том числе интерфейс командной строки, высокую трудоемкость подготовки качественной модели для расчета. Полнофункциональная модель здания для выполнения динамического расчета, как правило, отличается большими объемами и требует значительных вычислительных мощностей. Как правило, для расчета подобной задачи требуется компьютерный кластер. Степень детализации полученных результатов существенным образом зависит от доступных объемов хранилищ данных. Например, при весьма ограниченном размере файла модели (грубая сетка) 100 Мб процесс обрушения (свободного падения) здания высотой 50 м (15 этажей) занимает приблизительно 3,2 с. Размер файла вывода для каждой заданной точки времени приблизительно совпадает с размером файла модели (как правило, несколько больше).

Для изучения динамического поведения мы должны получить последовательность файлов вывода, подобно отдельным кадрам фильма. Только при выводе результатов с интервалом 0,1 с объем информации составляет около 3,5 Гб. Полное время процесса (с учетом моделирования разлета осколков) составляет до 10 с, что требует уже 10 Гб. При этом процесс самого взрыва не виден, так как характерное время данного процесса составляет 10^{-3} с. "Внутренняя шкала" масштаба времени, которую пакет рассчитывает

адаптивным образом (исходя из условия устойчивости расчетного процесса), может дробиться до 10^{-12} с. Такой малый временной шаг необходим для адекватного описания процесса взрыва, распределения давлений, распространения взрывной волны в начальный момент времени.

Существование таких "разновременных" масштабных шкал требует применения методологии иерархического моделирования, когда возможное воздействие взрыва моделируется на ограниченном элементе конструкции (например, колонна с разнесенными зарядами); из этого первого иерархического уровня извлекается информация (например, объем разрушенного материала колонны) и используется при моделировании обрушения всего сооружения. Таким образом, выходные параметры на нижележащем уровне являются входными параметрами верхнего уровня.

СОЗДАНИЕ ПОЛНОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЗДАНИЯ

В рамках предложенной иерархической концепции рассмотрим реализованную процедуру моделирования взрывного демонтажа зданий и сооружений. Принципиальным является стремление построить максимально правдоподобную модель реальной конструкции, что не позволяет использовать часто предлагаемые [4–8] модели материалов, стандартные для LS-DYNA, для моделирования армированного железобетона. Стандартные модели преимущественно используются для исследования поведения бетона при импульсном воздействии.

Используемая авторами статьи модель железобетонных конструкций состоит из двух компонентов. Основу составляют объемные элементы, моделирующие бетон. Одной из важнейших особенностей конечно-элементной сетки является необходимость делать ее строго регулярной. То есть практически вся сетка должна состоять из невырожденных шестигранных элементов (рис. 1).

Это обусловлено двумя причинами. С одной стороны, шестигранные элементы требуют большинство моделей материалов, предназначенных для расчета бетона. С другой стороны это необходимо для корректного моделирования арматуры, проложенной в бетоне. Модели материалов, используемые для моделирования бетона, могут быть выбраны из стандартных моделей. Один из возможных вариантов — модель

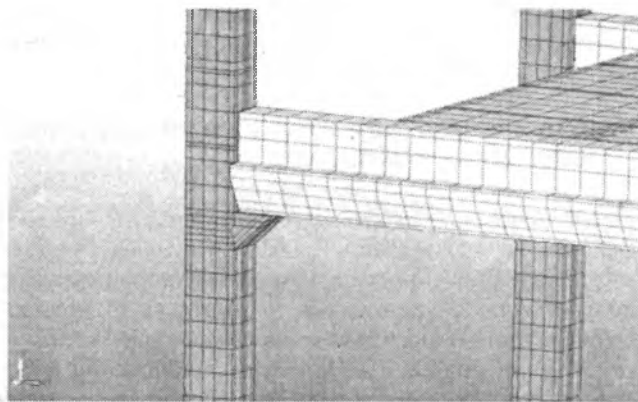


Рис. 1. Общий вид модели каркасного здания

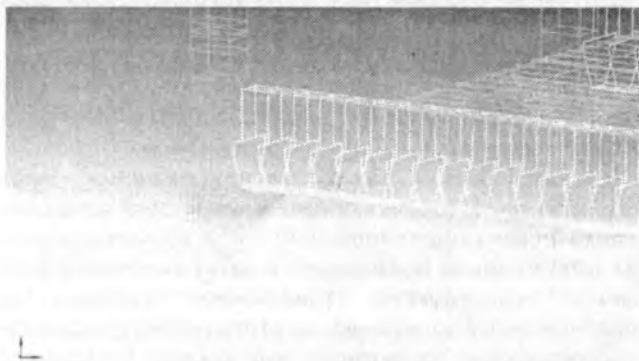


Рис. 2. Модель армирования конструкции

*MAT_CSCM_CONCRETE. Следует отметить, что в настоящее время для возведения несущих стен здания используются в основном газосиликатные блоки или кирпичная кладка. Стены, как правило, не имеют арматуры, и их прочность заметна ниже прочности несущих конструкций. При этом характеристики этих материалов имеют очень много общего с бетоном. Поэтому для их моделирования также использовался образец задания управляющей карты *MAT_CSCM_CONCRETE с пониженной прочностью.

Арматура моделируется с помощью системы балочных элементов, расположенных внутри объема бетона (рис. 2).

Параметры балочных элементов (расстояние между арматурой, число армирующих элементов в балке/колонне) выбирают в соответствии с существующими строительными сериями. Чтобы арматура и бетон оказались связанными между собой, узлы балочных элементов арматуры и объемных элементов бетона должны совпадать. Именно это и накладывает основные требования на сетку бетонной конструкции.

Результатом таких требований является неприменимость самых простых (например, автоматических) методов создания сетки, так как они, как правило, создают "свободное" разбиение, состоящее из четырехгранных элементов с хаотично расположенными узлами, через которые нельзя аккуратно пропустить арматуру. Более строго, в случае свободного разбиения, также существует возможность реализовать контакт арматура — бетон, задавая те или иные типы контактов между элементами. Но контакты будут осуществляться не по всем узлам, а только по совпадающим, что вызовет появление больших расчетных ошибок (виртуальных напряжений) в модели.

В качестве материала арматуры принимался материал *MAT_ELASTIC с табличными данными по свойствам арматурной стали. Совпадающие сетки приходится создавать либо с помощью специализированных программ (сеточных генераторов), либо вручную.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ: ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Как отмечалось, для моделирования взрывного воздействия на здание надо учитывать, что процесс взрыва и процесс обрушения здания имеют принципиально разные скорости протекания. Несмотря на то, что теоретически их можно выполнить в рамках одной конечно-элементной модели, это приведет к абсолютно неоправданному усложнению модели и очень значительному увеличению времени расчета.

Поэтому для моделирования взрывного воздействия был использован иерархический подход. В нем используется упрощенный способ, заключающийся в том, что в местах расположения зарядов прикладывается большое давление на небольшом промежутке времени (карта LOAD_SEGMENT_SET). Величина давления может быть взята как реальной (полученной из расчета взрывных процессов, либо из известных параметров взрывчатого вещества), так и заведомо избыточной, для гарантированного разрушения элемента конструкции. Как показали результаты тестовых расчетов, данный прием позволяет достаточно точно воспроизводить последствия взрыва.

Один из вариантов такого задания параметров давления и расчета приведен ниже. При этом для полноценного моделирования взрывного нагружения длительность нагрузки не должна превышать 1 мс (время реального процесса разрушения конструкций при взрыве). В случае реализации подрыва группами зарядов с задержкой во времени для ограничения действия воздушной ударной волны длительность между взрывами не должна превышать 40 мс для предотвращения воздействия осколков на соседние группы зарядов и линии управления взрывом.

Как правило, заряды располагаются в отверстиях, продельяемых в бетонных конструкциях, поэтому создание мест для зарядов должно быть выполнено на предыдущем шаге, в процессе создания сетки. В местах зарядов сетка уплотняется, чтобы создать элементы нужного размера. Затем в соответствующих местах колонны делаются отверстия путем удаления элементов соответствующих размеров (рис. 3).

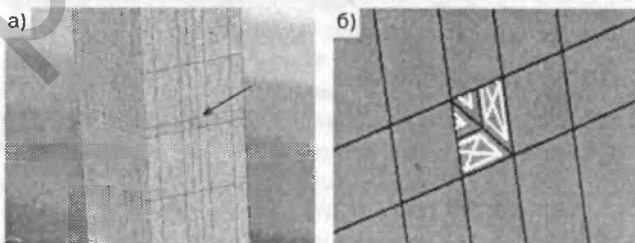


Рис. 3. Метка отверстия для заряда в конечно-элементной модели колонны (а) и нагружаемые взрывом сегменты (б)

Размеры ячейки выбирались на основе реальных размеров взрывчатых веществ исходя из условия, чтобы ВВ воздействовало по меньшей мере двумя ячейками. Такая грубая оценка связана с тем фактом, что по существу нас не интересует процесс детонации, а исключительно воздействие процесса на конструкции. После этого формируются наборы сегментов, к которым будет применяться давление взрыва (см. рис. 3б).

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТОДИКИ

Для предварительной оценки затрат машинного времени в рамках "сквозного" подхода в ALE-постановке была рассмотрена частичная задача взрывного разрушения несущей колонны. При моделировании подрыва несущей опоры использовалась модель реальной колонны, в которой арматура залита бетоном. Общее количество узлов модели составляло 948 004, геометрический размер ячейки 15x15x25 мм.

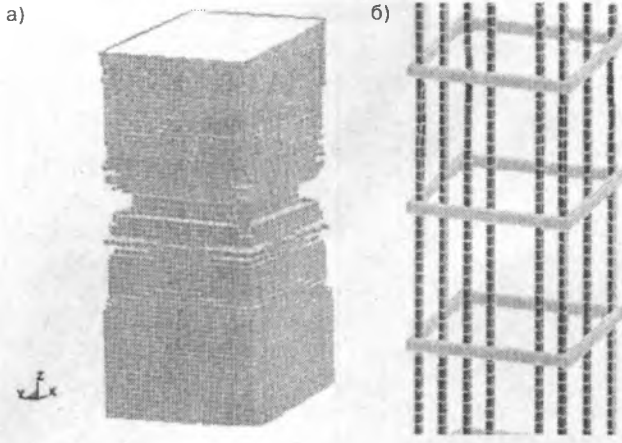


Рис. 4. Начальная стадия разрушения колонны (а) и деформации арматуры (б)

Моделирование происходило на 16 ядрах кластера SKIF-GRID. За 24 ч процессорного времени произведен расчет 30 мс реального времени разрушения опоры в результате взрыва. На рис. 4а представлено начало разрушения опоры, а именно разрушение бетонной компоненты, а также начальная деформация арматуры внутри цементного раствора (см. рис. 4б).

Для оценки достоверности результатов, получаемых с помощью предложенного иерархического подхода, была построена модель разрушения насосной станции на территории первого рудоуправления РУП "ПО Беларуськалий" в г. Солигорске. Здание представляло собой сборную конструкцию из железобетонных элементов и кирпича высотой более 25 м, длиной до 32 м и шириной до 10 м. Внутри здание разделено на три технологических этажа (рис. 5). В шести метрах

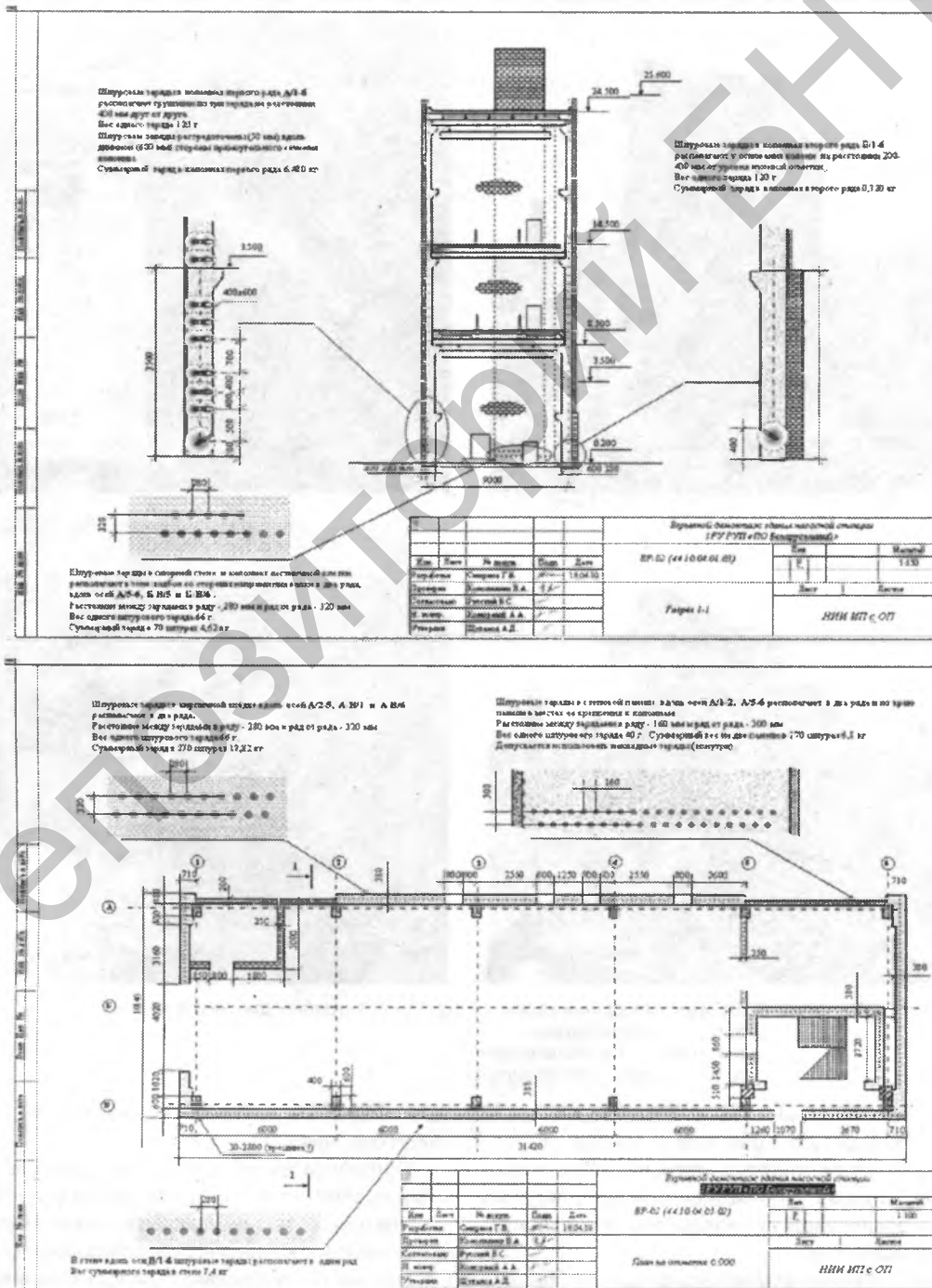


Рис. 5. Схема расположения шпуровых зарядов в несущих элементах здания насосной станции

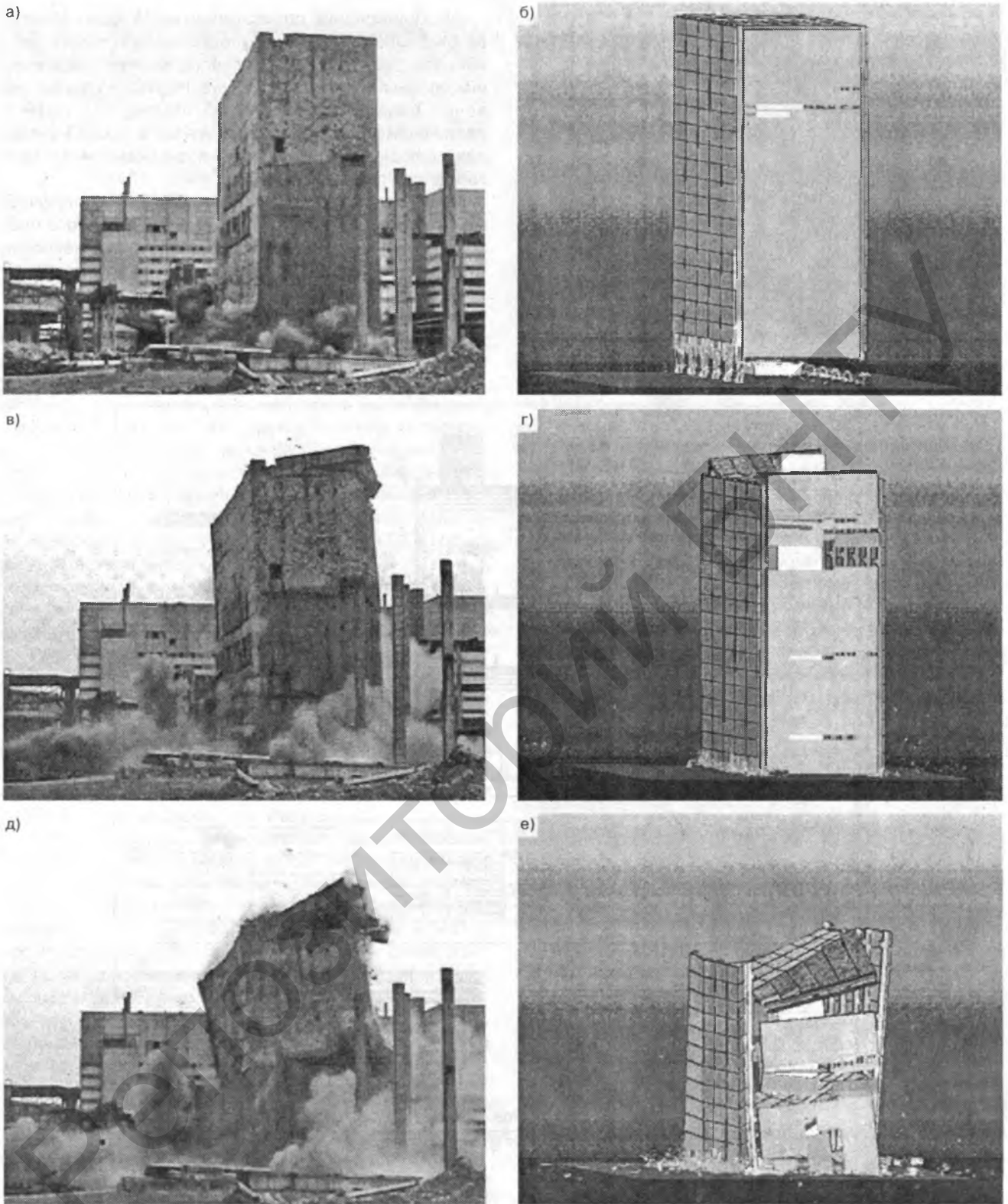


Рис. 6. Обрушение здания насосной станции, состояние здания и модели:
 а, б — в момент взрыва;
 в, г — через 1 с после взрыва;
 д, е — через 2 с после взрыва

вдоль здания проходил действующий технологический трубопровод для перекачки рассола в сгустители, повреждение которого в случае обрушения здания в противоположную сторону от выбранного направления валки грозило остановкой производства и серьезным материальным ущербом.

Полученный в результате моделирования процесс разрушения здания оказался достаточно близок к

процессу реального разрушения (рис. 6), но подтвердил наши опасения.

Потребовался дополнительный детальный расчет динамики поведения задних высотных опор и лифтовой шахты под нагрузкой, выдавливающей задние опоры конструкции в противоположную от направления валки сторону.

Задача была решена с использованием диагональных тросов, натягиваемых от переднего края перекры-

тий к верхнему краю задних опорных колонн второго и третьего этажей. Таким образом, создавался дополнительный опрокидывающий момент сил, поворачивающий конструкцию в заданном направлении валки (см. рис. 6д).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1 Использование конечно-элементных пакетов для прогнозирования динамических процессов, связанных с разрушением зданий и конструкций, позволяет повысить безопасность процессов демонтажа. Пакет LS-DYNA имеет достаточно встроенных возможностей для моделирования любых процессов, интересных с точки зрения практических задач. Использование отдельных моделей материалов для моделирования бетона и армирующих элементов
- 2 Достаточно трудоемкая процедура, но необходимая для адекватного представления поведения модели. Предложенная процедура связывания узлов модели позволяет представить поведение армированного массива как целого, что соответствует действительной конструкции. Предложенная иерархическая методика позволяет существенным образом снизить затраты машинного времени и уменьшает требования к ресурсам используемой техники.

Частично исследования выполнялись при поддержке проекта семирамочной программы EC Balticgrid II и программы союзного государства SKIF-GRID. Результаты моделирования, представленные в данной статье, получены с использованием HPC-кластера BY-BNTU (grid.bntu.by), приобретенного при поддержке программы союзного государства SKIF-GRID и гранта HATO PDD(SPS) — (EAP.NIG.983696).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тур, В. В. Проверки конструктивных систем зданий в особых расчетных ситуациях / В. В. Тур // Строительная наука и техника. — 2010. — № 4. — С. 7–22.
2. Xinzheng, L. Simulation for the Collapse of WTC after Aeroplane Impact / L. Xinzheng, J. Jianjing // Proc. Int. Conf. on Protection of Structures Against Hazard, Lok TS eds. Singapore Nov. — 2002. — P. 57–60.
3. Bangash, M. Y. H. Explosion-Resistant Buildings: Design, Analysis, and Case Studies / M. Y. H. Bangash, T. Bangash // Springer—Verlag. — 2006. — P. 784.
4. Unossen, Mattias. Numerical simulation of penetration and perforation of high performance concrete with 75mm steel projectile / Mattias Unossen // Weapons and Protection Division SE-147 25 TUMBA, FOA-R-00-01634-311-SE, November 2000. ISSN 1104-9154. — P. 67.
5. Murray, Yvonne D. Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159 / Yvonne D. Murray, Akram Abu-Odeh, Roger Bligh // Report FHWA-HRT-05-063.
6. Tavarez, Federico A. Simulation behavior of composite grid reinforced concrete beams using explicit finite element methods / Federico A. Tavarez // Master thesis University of Wisconsin. — Madison, 2001. — P. 152.
7. Agardh, L. FE-modeling of Fibre Reinforced Concrete Slabs Subjected to Blast Load / L. Agardh // J Phys IV France, Colloque C3 07 Colloque C3, 07 (1997), C3-723-728.
8. Dube, J. F. Comportement du beton en dynamique rapide / J. F. Dube, A. Kanji Nanji et C. Wielgosz // J Phys IV France, Colloque C3 07 (1997) C3-505-C3-509.

Статья поступила в редакцию 18.05.2012.