



МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ РЕАЛЬНЫХ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Мария БАРАБАШ

*Национальный авиационный университет, Киев, Украина
Эл. почта: bmari@ukr.net*

Аннотация. В статье рассматриваются несколько способов проектирования реальных зданий с защитными мероприятиями от прогрессирующего обрушения. Моделирование прогрессирующего обрушения необходимо для исследования живучести конструкции, возможности и механизма ее приспособления при аварийном выходе из строя отдельных конструктивных элементов. В связи с этим очевидна необходимость развития численных методов расчета зданий на прогрессирующее обрушение несущих конструктивных элементов при возникновении аварийной ситуации.

В статье представлена методика, позволяющая проверить устойчивость здания к прогрессирующему обрушению. Методика заключается в выполнении нелинейного расчета на особое (аварийное) сочетание нормативных нагрузок и воздействий, включающее нормативные постоянные и длительные нагрузки, а также воздействие гипотетических локальных разрушений несущих конструкций. Предлагается математическое обоснование моделирования процесса нагружения на основе уточненного шагового метода, как основного метода при моделировании процессов жизненного цикла конструкций.

Рассмотрен реальный пример выполнения расчета на прогрессирующее обрушение конструкций высотного жилого комплекса с подземным паркингом с учетом поэтапности монтажа, выполнена проверка здания на опрокидывание. Также рассмотрено существующее здание торгово-офисного комплекса «ГУЛИВЕР» с объектами общественного назначения и паркингом, где производился расчет на прогрессирующее обрушение плиты перекрытия верхнего технического этажа. Расчет плиты выполнялся на аварийную посадку либо крушение вертолета о плиту перекрытия.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Для оценки реальной живучести здания при аварийной ситуации и устойчивости к прогрессирующему обрушению рекомендуется рассчитывать конструкции с учетом физической и геометрической нелинейности и процессов моделирования жизненного цикла. Шаговые методы решения нелинейных задач в этих случаях наиболее приемлемы.

Ключевые слова: прогрессирующее обрушение, жизненный цикл, компьютерное моделирование, конструктивные элементы, нелинейный расчет, устойчивость, физическая и геометрическая нелинейность, шаговый метод.

Введение

Анализ ряда крупных обрушений в строительстве, произошедших за последние 30 лет показал, что основной причиной аварии является низкое качество проектирования и несовершенство современных строительных норм. Значительное количество обрушений произошло по причине невыполнения технологических требований монтажа, занижения марки бетона и т.д. Зачастую к авариям и обрушениям привели неверные проектные решения, которые были приняты из-за неправильного учета нагрузок, неправильного компьютерного моделирования сложных конструкций. В практике строительства также возникают аварии из-за недоскональных инженерно-геологических испытаний, недостаточному учету грунтовых вод и многих других факторов. Именно поэтому, определяющее значение при про-

ектировании имеет методика моделирования зданий с учетом реальной работы конструкций, нелинейных свойств материалов, учета процесса поэтапного возведения, а также построение корректной конструктивной схемы здания с учетом пространственной работы всех элементов. В настоящее время в связи с широким внедрением в практику проектирования новых объемно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений, а также новых материалов и конструкций, необходимо применение новых методов численного и компьютерного моделирования и расчета зданий на прочность, устойчивость, выявление резервов несущей способности путем приспособляемости конструкций, что повышает их живучесть. При этом основополагающим вопросом, в исследовании характера работы той

или иной конструктивной схемы, является выбор расчетной модели здания, а также того или иного метода расчета, от которого зависит достоверность получаемых впоследствии результатов.

В нормативных документах и публикациях до сих пор нет однозначности относительно методов расчета зданий и сооружений на устойчивость к прогрессирующему обрушению. Во многих современных программных комплексах прочностного анализа строительных конструкций предложены алгоритмы такого расчета, достоверность результатов которых не всегда подтверждается численными экспериментами и реальным проектированием. При переходе от реального объекта к его расчетной модели применяется ряд допущений, которые существенно влияют на окончательный результат. Причиной этого является ряд неопределенностей: эвристический выбор сценариев, схем и ограничений разрушения зданий, метод удаления элемента расчетной модели, а также определение критериев разрушения строительных конструкций. Данные, приведенные в нормативных документах и рекомендациях различных стран, зачастую отличаются или противоречат друг другу. Все большее значение приобретают численные эксперименты, проверенные реальным проектированием и позволяющие с высокой точностью и достоверностью описывать реальное поведение конструкций при воздействии различных нагрузок.

При проведении подобного численного эксперимента учитываются факторы реальной работы конструкций на всех этапах жизненного цикла: учет последовательности возведения здания, податливость и проседание вертикальных конструктивных элементов, динамические нагрузки (пульсационный ветер, сейсмика), пространственный характер работы здания, а также совместную работу диафрагм, рам не только на горизонтальные, но и на вертикальные нагрузки. Эти и другие факторы оказывают значительное влияние на формирование расчетной компьютерной модели здания и на выбор рационального метода расчета, позволяющего получить реальные данные о напряженно-деформированном состоянии (НДС) несущих конструкций.

Благодаря внедрению в практику проектирования компьютерных технологий обеспечивается возможность расчета сложных, большеразмерных расчетных моделей в пространственной постановке. Однако именно это и приводит к появлению одного из основных недостатков расчетных программ, а именно к сложности качественной проверки получаемых результатов, что в свою очередь, значительно увеличивает влияние чело-

веческого фактора на конечный результат, т.е. возрастают требования к высокой квалификации специалистов, применяющих современные расчетные программные комплексы.

Несмотря на то, что все расчетные программные комплексы основаны на методе конечных элементов (МКЭ), в нормативной базе, до сих пор практически не существует рекомендаций по составлению самой конечно-элементной модели здания, а также отсутствуют единые рекомендации по выбору типов конечных элементов (КЭ), способных обеспечить необходимую точность расчёта модели с учетом всех основных факторов, влияющих на прочность и устойчивость здания. Отчасти это объясняется наличием множества программных комплексов, имеющих в своих базах данных различные конечные элементы, анализ которых и выбор из них наиболее достоверных, весьма затруднителен. Однако, основной причиной является, отсутствие понимания самих факторов, которые необходимо учитывать при составлении расчетной компьютерной модели здания, а также особенностей их совместного влияния на НДС несущей системы здания. Создание конечно-элементной модели здания, т.е. по сути его расчетной схемы полностью ложится на самого проектировщика. Точность и достоверность, полученных в результате расчета данных, зависит от его понимания работы конструкций, ее виртуального отображения реальности.

Современные средства систем автоматизированного проектирования (САПР) позволяют перейти от ранее принятой концепции расчета (расчетная схема – НДС) к современной – моделирование процессов жизненного цикла (процесс возведения, процесс нагружения и др.). В частности, моделирование эксплуатационного периода конструкции, куда помимо таких факторов, как учет реологических свойств материала (ползучести), изменения конструктивной схемы в связи с реконструкцией и др., входит и моделирование процесса прогрессирующего разрушения.

В данной статье предложена методика моделирования и расчета на прогрессирующее обрушение высотного здания в программном комплексе ЛИРА-САПР на примере двух реальных объектов.

Обзор литературы по теме исследования

Проблема прогрессирующего обрушения возникла в 1968 году после расследования известной аварии двадцати двух этажного жилого дома в Лондоне. После этого события наступило время интенсивных исследований в этой области. Среди зарубежных ученых,

особый интерес представляют труды Leyendecker и Ellingwood (1977), Burnett (1975), Leyendecker и Burnett (1976), McGuire (1974) и т.д. В 90-х годах ученые продолжили заниматься этой проблемой, в связи с участвовавшими фактами международного терроризма. События 11 сентября 2001 года в Нью-Йорке (США), связанные с полным разрушением башен Всемирного торгового центра, поставили вопросы исследования и предотвращения таких разрушений, на совершенно новый уровень.

Интересный подход к обеспечению так называемой «структурной целостности здания» был предложен в работах – McGuire (1974), Fintel и Schultz (1976). Этот подход основывается на увеличении сопротивления конструкции разрушению в целом. При этом устойчивость конструкции против прогрессирующего разрушения не учитывается и не определяется.

Вопросам разработки методов предотвращения прогрессирующему обрушению посвящены труды Almazov (2006, 2007, 2009), Mutoka (2006), Plotnikov и Rastorguev (2008), Rastorguev и Mutoka (2006), Rastorguev (2003), работы сотрудников МНИИТЭП Shapiro *et al.* (2004), зарубежных ученых Powell (2005), Kaewkulchai и Williamson (2003), Pretlove *et al.* (1991), Gilmour и Viridi (1998), Izzudin *et al.* (2008), Vlassis *et al.* (2008) и других ученых. В работах показано влияние динамического эффекта при прогрессирующем обрушении, которое уменьшается при увеличении пластических деформаций.

В статье ученых Pretlove *et al.* (1991) поднят вопрос необходимости учета динамического перераспределения усилий при расчете на прогрессирующее обрушение. Авторы доказывают неточность статического расчета, и его непригодность для предотвращения прогрессирующего разрушения. Kaewkulchai и Williamson (2003) на простых примерах доказывают необходимость учета динамических эффектов. Gilmour и Viridi (1998) для анализа обрушения плоской железобетонной рамы использовали трехмерный квазистатический нелинейный элемент.

Rastorguev (2003) предложил методы обеспечения живучести здания на основе динамического расчета конструкции многоэтажного плоского каркаса при удалении колонны некоторого этажа в двух случаях: прогрессирующее обрушение части здания и потеря общей устойчивости здания.

В настоящее время исследованиями в данной области занимается более 20 ведущих научно-исследовательских, проектных и строительных организаций. Одной из основных в Российской Федерации, является

ОАО «ЦНИИЭП жилища», ответственными организациями по данным исследованиям являются ведущие отраслевые научно-исследовательские институты, такие как: ЦНИИСК; им. В. А. Кучеренко; НИИЖБ, НИИПИ Генплана Москвы; НИИОСП им. Н. М. Герсеванова; Моспроект; МНИИТЭП; в Украине такими организациями являются: НИИ строительных конструкций, НИИ строительного производства, Полтавский национальный технический университет, Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры; а также Всемирная академия наук комплексной безопасности и другие, ведущие научные и проектные организации России, Украины, стран ближнего и дальнего зарубежья. Благодаря большой заинтересованности со стороны научных организаций, за последние годы, были разработаны и выпущены новые нормативные документы, регламентирующие строительство высотных зданий. Среди них, такие как, DBN-V.2.2.-24:2009, MGSN 4.19-2005, MGSN 1.01-99, STO 008-02495342-2009, TSN 31-332-2006.

С введением в действие нормативных документов, сформирован ряд требований, согласно которым должен осуществляться процесс проектирования здания. Одним из таких требований является расчет здания на прогрессирующее обрушение. Такой расчет относится к аварийной ситуации, и подразумевает локальное обрушение или повреждение отдельных элементов несущих конструкций в пределах одного этажа или части перекрытия (ограниченной площадью до 80 м² или диаметром до 10 м), которое не ведет к полному разрушению всей конструкции и здания в целом. При этом в отдельных элементах конструкций допускается развитие трещин и пластических деформаций в арматуре. Расчет прочности и устойчивости каркаса сооружения проводится на аварийное сочетание нагрузок. При этом в соответствии с DBN-V.2.2.-24:2009 – предельные перемещения конструкций не регламентируются, необходимо оценить общую устойчивость здания в целом.

Аварийные воздействия могут быть вызваны деятельностью человека при пожаре, взрыве газа, терактов, наездов транспорта и др. или могут быть вызваны природными явлениями такими как: землетрясения, ураганы, оползни, неравномерные деформации оснований. Так как полностью невозможно исключить вероятность возникновения таких ситуаций, необходимо обеспечить определенную степень безопасности людей и сохранности их имущества за счет уменьшения вероятности прогрессирующего обрушения при локальных разрушениях несущих конструкций.

В документах, определяющих правила проектирования для предотвращения прогрессирующего обрушения, например «Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения», разработанные МНИИТЭП, НИИЖБ, DBN-V.2.2.-24:2009 и др. (MGSN 4.19-2005, STO 008-02495342-2009, TSN 31-332-2006) требования для решения данной проблемы изложены следующим образом:

1. Несущая конструктивная система жилых зданий должна быть устойчива к прогрессирующему (лавинообразному, цепному) обрушению в случае локального разрушения отдельных конструкций при аварийных воздействиях (взрыва бытового газа, пожара и т.п.).
2. Допускаются локальные разрушения отдельных несущих конструкций, но эти первичные разрушения не должны приводить к обрушению соседних конструкций, на которые передается нагрузка, воспринимавшаяся ранее элементами, поврежденными в результате аварийного воздействия.
3. Конструктивная система здания должна обеспечивать его прочность и устойчивость, как минимум на время, необходимое для эвакуации людей. Перемещения конструкций и раскрытие трещин в них не ограничиваются.

Постановка задачи

Моделирование прогрессирующего обрушения необходимо для исследования живучести конструкции, возможности и механизма ее приспособления при аварийном выходе из строя отдельных конструктивных элементов. Такой анализ может быть сделан в рамках нелинейного динамического расчета, однако его выполнение при массовом проектировании в настоящее время не представляется возможным ввиду большой сложности и ресурсоемкости расчета. В то же время, можно считать несостоятельной и попытку моделирования процесса «прогрессирующего» разрушения конструкции на основе линейно-упругого статического расчета, предпринятую в некоторых работах и программных комплексах. Для решения этого класса задач предлагается математического моделирования процесса нагружения на основе уточненного шагового метода, как основного метода при моделировании процессов жизненного цикла конструкций.

В данной работе моделирование «форс-мажорной» аварийной ситуации предлагается проводить по следующей схеме. На первом этапе выполняется расчет конструкции в эксплуатационной стадии или в

нескольких монтажных и эксплуатационных стадиях, с учетом истории возведения и нагружения конструкции, предшествующих локальному разрушению. При этом учитывается физическая и геометрическая нелинейность работы конструкции. Напряженно-деформированное состояние первого этапа является стартовым для второго этапа, на котором выполняется расчет схемы с выключенными из работы (удаленными) элементами. Нагрузкой на втором этапе являются усилия в удаленных элементах, увеличенные на коэффициент, учитывающий динамику процесса. Расчет также необходимо проводить с учетом физической и геометрической нелинейности. Если при этом окажется, что некоторые элементы модели не удовлетворяют условию прочности (т.е. разрушаются), то расчет продолжается аналогичным образом на следующей стадии без таких элементов. Расчет будет завершен либо локализацией процесса разрушения, либо полным разрушением несущей системы. Однако следует заметить, что в большинстве случаев для предотвращения «прогрессирующего» обрушения конструкции необходимо обеспечить несущую способность всех ее элементов при начальных аварийных повреждениях. В этих случаях расчет будет остановлен на первой стадии второго этапа расчета и моделирование процесса «прогрессирующего» обрушения не потребует.

Далее на реальных примерах рассматривается методика оценки устойчивости каркасов высотных зданий при обрушении разных типов: обрушение опорной колонны нижнего этажа; обрушение части плиты перекрытия верхнего этажа площадью до 80 м².

Описание исследования

При реализации расчетов на прогрессирующее обрушение, необходимо принимать во внимание условность исходных предпосылок, заключающаяся в следующем:

- отсутствует достоверная информация о месте и причине возникновения процесса и характере разрушения;
- реальные параметры предельных разрушающих характеристик материалов, как правило, отличаются от условий прочности, принятых в нормах, поэтому в расчетных комплексах, например, таких как ЛИРА-САПР (подсистема МОНТАЖ), при физически-нелинейном расчете, кроме нормируемых данных о материалах (бетон, арматура), предусматривается задание произвольных расчетных значений параметров прочности (в том числе по результатам натур-

ных наблюдений). Таким образом, в результате численного моделирования можно получить качественную оценку характеристик устойчивости конструкции по отношению к прогрессирующему обрушению, а также сопоставить несколько возможных сценариев обрушения с целью выявления слабых мест конструкции.

Для оценки устойчивости здания против прогрессирующего обрушения необходимо рассматривать лишь наиболее опасные расчетные схемы разрушения.

Устойчивость к прогрессирующему обрушению проверяется нелинейным расчетом на особое (аварийное) сочетание нормативных нагрузок и воздействий, включающее нормативные постоянные и длительные нагрузки, а также воздействие гипотетических локальных разрушений несущих конструкций. Допускается в первом приближении после определения зоны локального обрушения, например по подсистеме ЛИТЕРА в ПК ЛИРА-САПР, выполнять расчет конструкций с учетом демонтажа разрушенных элементов при пониженных модулях упругости несущих элементов: вертикальных с коэффициентом – 0,6E0, плит перекрытия (покрытия) – 0,3E0. Перемещения элементов конструкций и развитие трещин не ограничиваются, но коэффициент запаса при проверке устойчивости такой системы с демонтированными элементами должен быть более двух.

Коэффициенты надежности по нагрузкам следует принимать равными единице. За расчетные характеристики материалов принимаются их нормативные значения. Кроме того, расчетные сопротивления умножают на повышающие коэффициенты условий работы, учитывающие малую вероятность аварийных воздействий и рост прочности бетона после возведения здания, а также возможность работы арматуры за пределом упругости. Такая возможность введения поправочных коэффициентов к прочности материала и модулю упругости на различных стадиях монтажа и демонтажа реализована в расчетном процессоре ПК ЛИРА-САПР (подсистема МОНТАЖ).

Минимальная площадь продольной и поперечной арматуры в железобетонных перекрытиях и покрытиях должна быть не менее 0,25% от площади бетона, при этом арматура должна быть непрерывной и стыковаться в соответствии с требованиями по проектированию железобетонных конструкций.

Так как предусмотреть все сценарии прогрессирующего обрушения невозможно то, ключевым пунктом в расчетах на аварийное обрушение является выбор и утверждение совместно с конструктором и заказчиком возможных сценариев обрушения, максимально

приближенных к реальным условиям расположения объекта на местности, например:

- при расположении здания рядом с транспортными путями расчет сооружения выполняется при удалении крайних колонн;
- при наличии вертолетной площадки, расчет выполняется на обрушение участка плиты;
- при наличии в сооружении или рядом газо-распределительных станций выполняется расчет на взрыв газа;
- при наличии подпорных стен и других защитных сооружений – расчет выполняется на обрушение участка этих сооружений.

При этом, учитывая требования DBN-V.2.2.-24:2009 (Приложение Е), допускается обрушение отдельных элементов на площади до 80 м²:

- сечение удаляемых ЖБ элементов не должно быть более 0,9 м²;
- сечение удаляемых фибробетонных элементов должно быть не более 0,7 м²;
- сечение удаляемой жесткой арматуры не должно быть более 15%.
- перекрытие высотного сооружения должно быть рассчитано на восприятие участка вышерасположенного перекрытия площадью до 80 м² с коэффициентом динамичности 1,5.

Математические основы моделирования

Определяющим фактором напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций высотных зданий является физическая нелинейность, обусловленная реологическими свойствами железобетона, а именно нелинейной зависимостью $\sigma-\epsilon$. Эта функция, на основе ряда исследований, задается по-разному – в виде ломаной, параболы, экспоненты и др. Ее сложность обуславливает задание исходных нелинейных уравнений не в явном виде, а в виде алгоритмической записи выражений для коэффициентов нелинейных уравнений. Все существующие методы решения нелинейных уравнений больших порядков основаны на линеаризации нелинейных уравнений, т.е. поиск решения нелинейных уравнений осуществляется решением рекуррентной последовательности линейных. К наиболее распространенным методам этого типа относится метод Ньютона-Рафсона, метод компенсирующих нагрузок (упрощенный метод Ньютона, метод Ильюшина), метод секущих (метод Биргера), шаговые методы. Последние оказываются очень удобными для решения практических задач строительной механики, так как в физическом смысле его

можно трактовать как метод математического моделирования процесса нагружения, а при определенных модификациях его можно применять для решения задач с ниспадающей ветвью σ - ϵ . Шаговые методы единообразно укладываются в схему известного в прикладной математике метода дифференцирования по параметру (метода продолжения). Впервые этот метод для численного решения был применен ученым Lahage (1934). Дальнейшее его развитие и применение для решения практических задач строительной механики было выполнено в других работах (Feodos'ev 1963; Gorodeckij 1963).

Если представить нелинейные разрешающие уравнения в операторном виде:

$$Au = f, \quad (1)$$

где A – нелинейный оператор задачи; u – искомая разрешающая функция; f – внешняя нагрузка, то схема простого шагового метода заключается во введении коэффициента t (t изменяется от 0 до 1) к нагрузке f так, чтобы при $t = 1$ уравнение принимало бы вид (1), при $t = 0$ было бы известно решение задачи.

Т.е. из $Au_0 = 0$ вытекало бы, что $u_0 = 0$. Рекуррентная последовательность линеаризованных уравнений на m шаге имеет вид:

$$Au_m = t_m f. \quad (2)$$

Изменим t_m на величину Δt_{m+1} так, чтобы $t_{m+1} = t_m + \Delta t_{m+1}$ была ближе к единице, чем t_m .

Тогда:

$$A(u_m + \Delta u_{m+1}) = (t_m + \Delta t_{m+1})f. \quad (3)$$

Разложим левую часть в ряд Тейлора, тогда:

$$Au_m + \sum_{i=1}^k \frac{1}{i!} \left(\frac{\partial^i}{\partial u^i} A | u_m \cdot \Delta u_{m+1}^i \right) + R_k = t_m f + \Delta t_{m+1} f, \quad (4)$$

где R_k – остаточный член ряда Тейлора, содержащий члены высших порядков малости.

Пренебрегая квадратами и высшими степенями Δu_{m+1} (величина Δt должна быть достаточно малой, чтобы допускать эту процедуру) и вычитая из (4) соотношение (2) получим линеаризованную систему для нахождения Δu_{m+1} , т.е.:

$$A_m \Delta u_{m+1} = \Delta t_{m+1} f, \quad u_{m+1} = u_m + \Delta u_{m+1}, \quad (5)$$

где A_m – линейный оператор, который соответствует линейно-деформируемой системе с модулями деформации, соответствующими:

$$E_m = \left. \frac{d}{dE} \sigma \right|_{\epsilon_i(u_m)}. \quad (6)$$

В физическом смысле этот процесс можно трактовать как изменение НДС нелинейно-деформируемой системы при постепенном увеличении нагрузки.

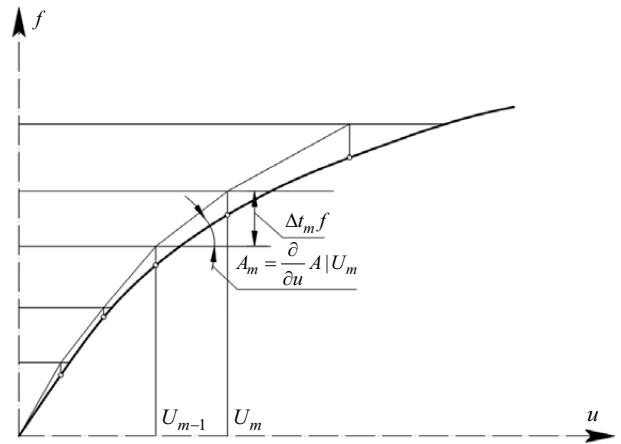


Рис. 1. Геометрическая интерпретация метода математического моделирования процесса нагружения

Fig. 1. Geometrical interpretation of loading process' mathematical model

1 pav. Apkrovimo proceso geometrinė interpretacija taikant matematinį modeliavimą

На рис. 1 приведена геометрическая интерпретация этого метода для одномерного случая.

Исследуем сходимость рассматриваемого метода. Для этого вычислительную схему (5) представим в виде:

$$u_{m+1} = u_m + B(Au_{m+1}) \frac{1}{N}, \quad \text{где } u_0 = 0, \quad m = 1, 2, \dots, N, \quad (7)$$

где $B = [A]^{-1}$ – ограниченный оператор, N – общее число равномерных шагов.

Пользуясь обобщенной формулой Ньютона-Лейбница точные значения перемещений запишем в виде:

$$\check{u}_1 = \int_0^1 B(\tau) d\tau, \quad \check{u}_{m+1} = \check{u}_m + \int_{f^m/m}^{f^{m+1}} B(\tau) d\tau, \quad (8)$$

где τ – возможные приращения.

Приближенные значения перемещений запишем в виде:

$$u_1 = \int_0^f B(0) d\tau, \quad u_{m+1} = u_m + \int_{f^m/m}^{f^{m+1}} B(Au_m) d\tau. \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует оценка точности решения на первом шаге:

$$\|\check{u}_1 - u_1\|_{w_2^{2p}} \leq C_1 \frac{\|f_1\|_{L_2}^2}{N}, \quad (10)$$

где C_1 – константа, $\|\check{u}_1 - u_1\|_{w_2^{2p}}$ – норма в пространстве w_2^{2p} , $2p$ – порядок диф. оператора, $\|f_1\|_{L_2}^2$ – норма в пространстве L_2 .

Выполняя подобные операции на каждом шаге, получим оценку для окончательного решения:

$$\|\check{u}_N - u_N\|_{w_2^{2p}} \leq C_N \frac{\|f\|_{L_2}}{N}. \quad (11)$$

Оценка (11) свидетельствует, что рассматриваемый метод сходится, причем погрешность убывает пропорционально количеству принятых шагов.

Шаговые методы имеют многочисленные модификации. Так, например, можно выполнять однократное уточнение на каждом шаге. В этом случае вычислительная схема имеет вид:

$$A_m \Delta u_{m+1} = f \frac{m+1}{N} - A u_m, \quad u_{m+1} = u_m + \Delta u_{m+1}, \quad (12)$$

а геометрическая интерпретация имеет вид, показанный на рис. 2.

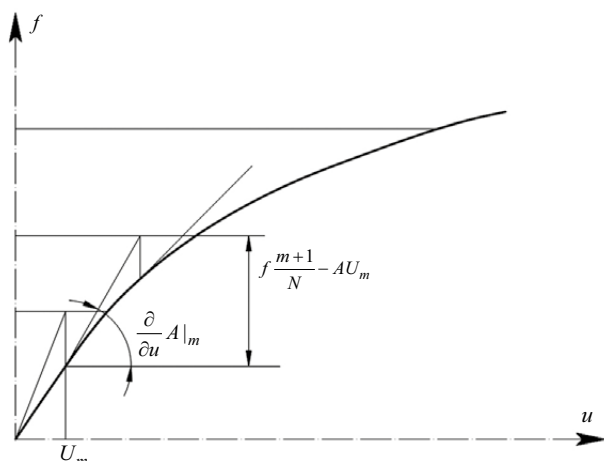


Рис. 2. Геометрическая интерпретация шагового метода с уточнением на каждом шаге

Fig. 2. Geometric interpretation of step method with refinement on each step

2 pav. Žingsninės regresijos su patikslinimu interpretacija

В этом случае можно показать, что погрешность убывает пропорционально N^m .

Как указывалось выше, шаговые методы в физическом смысле можно трактовать, как математическое моделирование процессов нагружения. Это обуславливает их применение, как основных методов при моделировании процессов жизненного цикла конструкций.

Особенности моделирования прогрессирующего обрушения в программном комплексе ЛИРА-САПР

Рассмотрим реальный пример выполнения расчета на прогрессирующее обрушение конструкций высотного жилого комплекса с подземным паркингом по проспекту Героев Сталинграда, 2 в Оболонском районе г. Киева. Общая высота здания $H = +110\text{ м}$, $H_{\text{подвала}} = -4,3\text{ м}$, фундаментная плита $1,35\text{ м}$, 486 буро-инъекционных свай диаметром 62 см . Расчет выполнен с учетом поэтапности возведения и с учетом нелинейной работы материалов в программном комплексе ЛИРА-САПР. Общий вид здания и конечно-элементная схема представлена на рис. 3. Для получения достоверных данных о напряженно-деформированном состоянии (НДС) высотного здания, расчет выполняется с учетом поэтапности монтажа (см. рис. 4).

Для оценки устойчивости здания против прогрессирующего обрушения рассмотрены вариант разрушения одной из колонн сечением $60 \times 60\text{ см}$ в средней части здания с максимальным пролетом плиты $7,2\text{ м}$. После удаления опорной колонны пролет соответственно становится равным $14,4\text{ м}$. (рис. 5).

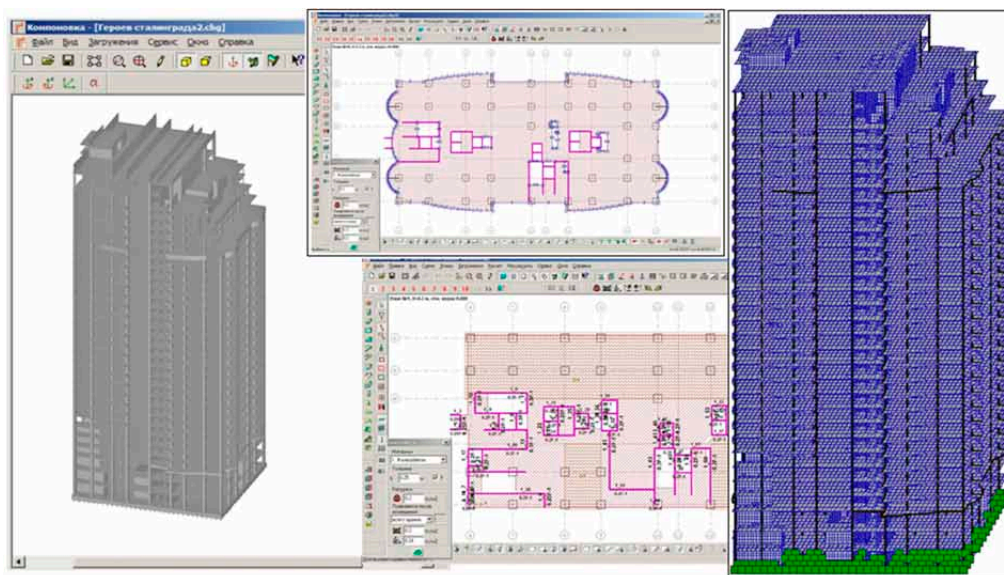


Рис. 3. Пространственная схема здания, планы этажей и конечно-элементная схема

Fig. 3. 3D scheme of building, floor plans and finite element scheme

3 pav. Pastato erdvinis modelis, aukštų planai ir baigtinių elementų modelis

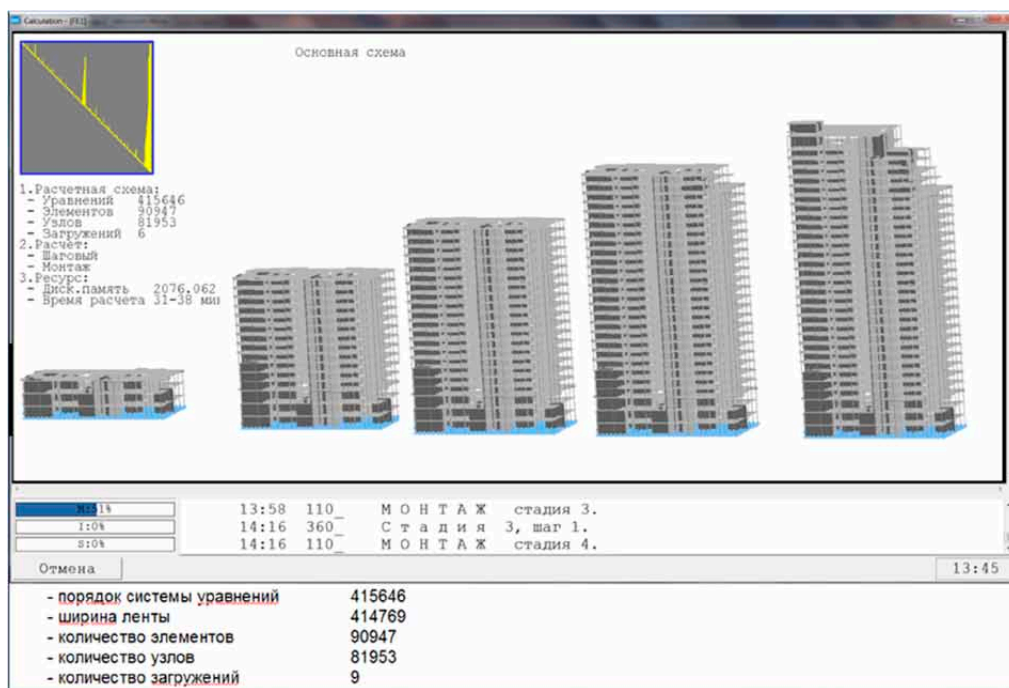


Рис. 4. Учет стадий монтажа каркаса в подсистеме МОНТАЖ+ ПК ЛИРА-САПР

Fig. 4. Stages of installation of framework in a subsystem MONTAZH+ PK LIRA-SAPR

4 pav. Pastato karkaso montavimo stadijos modeliujant programine įranga MONTAZH+ PK LIRA-SAPR

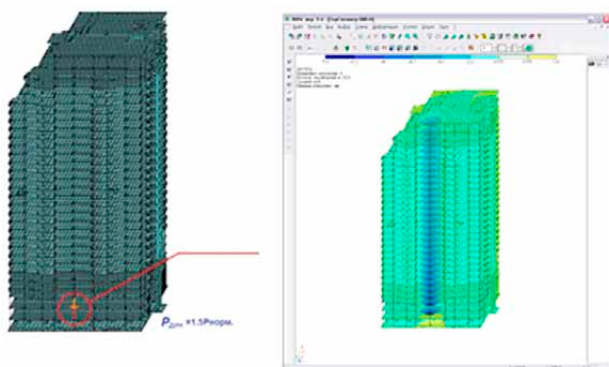


Рис. 5. Конечно-элементная схема каркаса и неупругие деформации при обрушении колонны, смоделированные в подсистеме МОНТАЖ+ ПК ЛИРА-САПР

Fig. 5. The finite element scheme of the framework and nonelastic deformation during collapse of the column, simulated in the subsystem MONTAZH+ PK LIRA-SAPR

5 pav. Karkaso baigtinių elementų schema ir kolonos griūties netampriosios deformacijos modeliujant naudojant programinę įrangą MONTAZH+ PK LIRA-SAPR

После удаления колонны выполняется проверка здания на опрокидывание (рис. 6). Задачи устойчивости тесно связаны с геометрически нелинейными задачами. Реализованный в программном комплексе ЛИРА-САПР метод устойчивости предполагает исследование устойчивости здания по деформированной схеме. После приложения к зданию ветровых нагру-

зок выполняется расчет на все расчетные сочетания нагрузок (РСН) и анализ перемещений и максимальных ускорений верхних этажей (не более 8 см/с²). При этом интегрально учитывается заниженная жесткость вертикальных элементов и плит перекрытия с учетом инженерной нелинейности. Для устойчивости системы $K_{запаса}$ должен быть более 2,0.

В качестве второго примера рассмотрим существующее здание торгово-офисного комплекса «ГУЛИВЕР» с объектами общественного назначения и паркингом по адресу: Спортивная пл. 1 в Печерском р-не г. Киева. Фундаментная плита 1,8 м на -15,8 м; сваи $d = 82$ см – 223 шт, $P_{рас.} = 530$ тс; монолитный каркас +138,9 м.

Производился расчет шаговым методом на прогрессирующее обрушение плиты перекрытия верхнего технического этажа:

$$\{\sigma_i\} = \{\sigma_{i-1}\} + \{\Delta\sigma_i\}, \quad \{\Delta\sigma_i\} = [D]_i \times \{\Delta\varepsilon\}_i,$$

где $[D]$ – переменная матрица упругопластичности элемента с трещинами на i -том шаге; $\{\Delta\varepsilon\}$ – тензор приращения деформации; $\{\Delta\sigma\}$ – тензор приращения напряжений.

Критериями разрушения конструкций могут служить геометрическая изменяемость системы на i -том шаге; лавинообразный рост деформаций и переме-

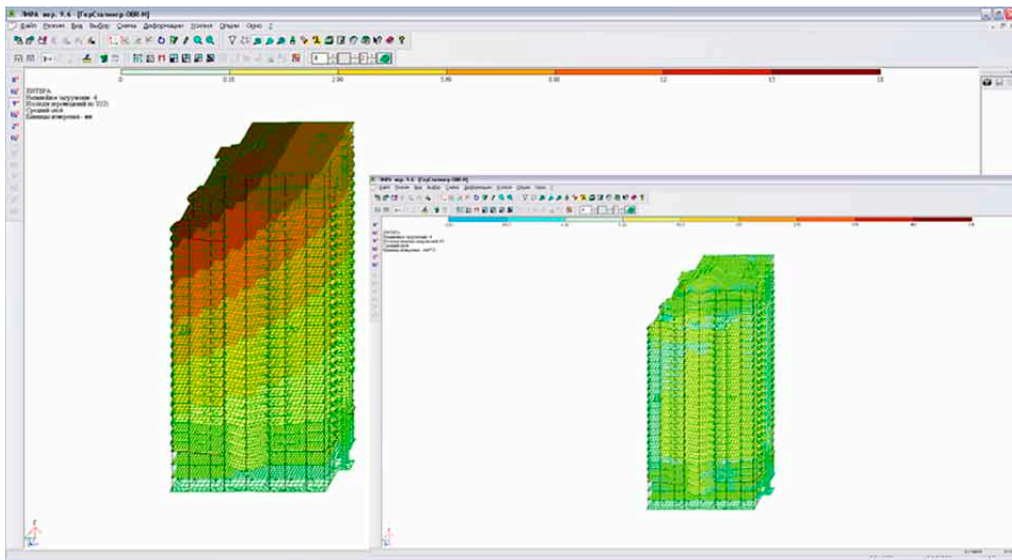


Рис. 6. Проверка на общую устойчивость каркаса против опрокидывания
 Fig. 6. Checking the overall stability of framework against overturning
 6 pav. Karkaso stabilumo prieš vrtimą patikra

щений системы. При этом в программном комплексе ЛИРА-САПР выдается сообщение «разрушение конструкции» и дальнейший процесс расчета прекращается.

Так как здание размещает вертолетную площадку, то расчет плиты выполняется на аварийную посадку либо крушение вертолета о плиту перекрытия. Участок перекрытия верхнего этажа был разрушен и обломки с частями перекрытия оказались на нижерасположенном этаже. В программном комплексе «ЛИРА-САПР» было смоделировано обрушение и рассчитано два верхних этажа здания (рис. 7). Далее проводится анализ трещинообразования на участке обрушения верхнего перекрытия (рис. 8). На рисунках видно, активное трещинообразование расположено в наиболее загруженном участке плиты.

Приведенный расчет плиты перекрытия над техническим верхним этажом на отметке +127.2 м на прогрессирующее обрушение при дополнительной нагрузке от части верхней плиты площадью 80 м² на нормативные нагрузки при коэффициенте динамичности 1,2 в физически нелинейной постановке показывает, что в плите развиваются зоны трещин и образуются пластические шарниры. Максимальные деформации плиты могут достигать 50 мм. В нижней арматуре плиты в центре пролета зафиксирована текучесть арматуры. При этом в верхней зоне плиты над пилонами и колоннами также развиваются верхние трещины, но разрывов арматуры в плите не зафиксировано. Это свидетельствует, что эксплуатационная пригодность плиты не обеспечи-

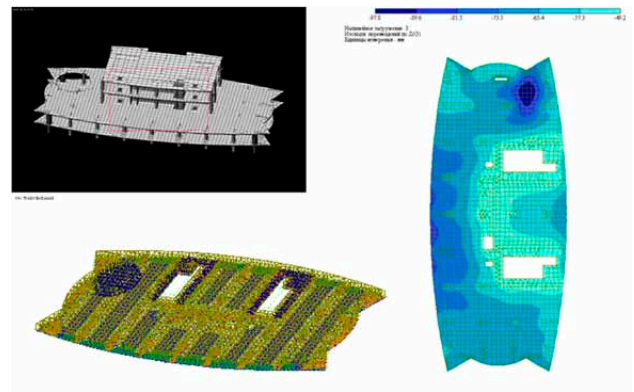


Рис. 7. Расчетная модель и результаты расчета плиты перекрытия

Fig. 7. The computational model and calculation results of floor slab

7 pav. Perdengimo plokštės modelis ir modeliavimo rezultatai

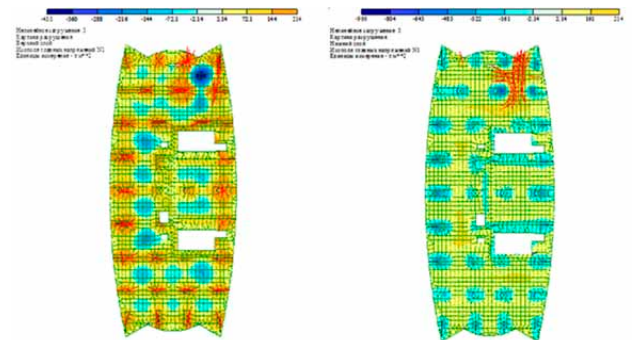


Рис. 8. Трещинообразование в местах обрушения вышележащего перекрытия

Fig. 8. Crack formation in areas of collapse of the overlying slab

8 pav. Įtrūkiai esant aukščiau esančios perdengimo plokštės kritimui

вается, но дальнейшее прогрессирующее обрушение плит не происходит при обеспечении армирования в нижнем слое плиты в середине пролета, и над опорами в верхней зоне плиты не менее 15,4 см²/пм (Ø14 шаг 100 мм).

Заключение

При проектировании высотных зданий необходимо создавать конструктивные предпосылки для обеспечения приспособляемости конструкций к различным ситуациям, в том числе и форс-мажорным. Для решения этих задач необходимо рассчитывать конструкции в нелинейной постановке. Шаговые методы решения нелинейных задач в этих случаях наиболее приемлемы. При учете критерия безопасности и максимального предотвращения аварийных ситуаций необходимо стремиться решать эти вопросы наиболее экономичными способами.

Реализованные в программном комплексе ЛИРА-САПР методика физически-нелинейного расчета конструкций с трещинами позволяет выполнять оценку устойчивости и устойчивой прочности каркаса при прогрессирующем обрушении.

Литература

- Almazov, V. O. 2006. *Predotvrashhchenie progressiruyushchego razrusheniya*. Moskva: MGSU.
- Almazov, V. O. 2007. *Proyektirovanie zhelezobetonnykh konstruktсий po evronormam*. Moskva: IASV.
- Almazov, V. O. 2009. *Soprotivlenie progressiruyushchemu razrusheniyu: raschyotnye i konstruktivnye meropriyatiya*. TsNIISK.
- Burnett, E. F. P. 1975. *The Avoidance of Progressive Collapse: Regulatory Approaches to the Problem*. NBS-GCR 75-48. National Bureau of Standards, Washington, D.C.
- DBN-V.2.2.-24:2009. *Proektuvannja vysotnykh zhytlovykh i gromads'kykh budynkiv: Derzhavni budivel'ni normy Ukrainy*.
- Feodos'ev, V. I. 1963. Primenenie shagovogo metoda k analizu ustojchivosti sterzhya, *Prikladnaya matematika* 2: 265–274.
- Fintel, M.; Schultz, D. M. 1976. A philosophy for structural integrity of large panel buildings, *Journal of the Prestressed Concrete Institute* 21(3): 46–69.
- Gilmour, J.; Viridi, K. S. 1998. Numerical modelling of the progressive collapse of framed structures as a result of impact or explosion, in *Proceedings of the 2nd International PhD Symposium in Civil Engineering*, 26–28 August 1998, Budapest, Hungary.
- Gorodeckij, A. S. 1963. Voprosy raschyota konstruktсий v uprugoplasticheskoj stadii s uchyotom primeneniya JEVМ v stroitel'noj mehanike, *Trudy pervogo vsesoyuznogo soveshchaniya po primeneniyu JEVМ v stroitel'noj mehanike* (g. Leningrad), Leningrad: Izdatelstvo literature po stroitel'stvu, 169–175.
- Izzudin, B. A.; Vlassis, A. G.; Elghazouli, A. Y.; Nethercot, D. A. 2008. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss – Part I: simplified assessment framework, *Engineering Structures* 30(5): 1308–1318. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.011>
- Kaewkulchai, G.; Williamson, E. 2003. Dynamic behavior of planar frames during progressive collapse, in *Proceedings of the 16th ASCE Engineering Mechanics Conference*, 16–18 July 2003, University of Washington, Seattle.
- Lahage, E. 1934. *Une methode de resolution d'une categorie d'equations transcendentes*. C.R.
- Leyendecker, E. V.; Burnett, E. F. P. 1976. *The incidence of abnormal loading in residential buildings*. National Bureau of Standards, Washington, DC.
- Leyendecker, E. V.; Ellingwood, B. R. 1977. *Design methods for reducing the risk of progressive collapse in buildings*. National Bureau of Standards, Washington, DC.
- MGSN 4.19-2005. *Mnogofunkcional'nye vysotnye zdaniya i kompleksy. Vremennye normy i pravila*.
- MGSN 1.01-99. *Normy i pravila planirovki i zastroyki uchastkov territorii vysotnykh zdaniy, vysotnykh gradostroitel'nykh kompleksov v g. Moskva*.
- McGuire, W. 1974. Prevention of Progressive Collapse, in *Proceedings of the Regional Conference on Tall Buildings*, 23–24 January 1974, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.
- Mutoka, K. N. 2006. *Zhivuchest' mnogoetazhnykh karkasnykh zhelezobetonnykh grazhdanskih zdaniy pri osobykh vozdeystviyah*: Dissertaciya. Moskva: MGSU. 185 s.
- Plotnikov, A. I.; Rastorguev, B. S. 2008. Raschyot nesushhchih konstruktсий monolitnykh zhelezobetonnykh zdaniy na progressiruyushchee obrushenie s uchyotom dinamicheskikh jeffektov, *Sbornik nauchnykh trudov Instituta stroitel'stva i arkhitektury*, Moskva: MGSU, 127–135.
- Powell, G. 2005. Progressive Collapse: Case studies Using Nonlinear Analysis, in *Proceedings of the Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond*, 1–14. [http://dx.doi.org/10.1061/40753\(171\)216](http://dx.doi.org/10.1061/40753(171)216)
- Rastorguev, B. S. 2003. Obespechenie zhivuchesti zdaniy pri osobykh dinamicheskikh vozdeystviyah, *Sejmostojkoe stroitel'stvo: Bezopasnost sooruzhenij* 4: 45–48.
- Rastorguev, B. S.; Mutoka, K. N. 2006. Deformirovanie konstruktсий perekrytij karkasnykh zdaniy posle vnezapnogo razrusheniya odnoj kolonny, *Sejmostojkoe stroitel'stvo: Bezopasnost sooruzhenij* 1: 12–15.
- Shapiro, G. I.; Gur'ev, V. V.; Ejsman, Yu. A. 2004. *Metodika raschyota monolitnykh zhilykh zdaniy na ustojchivost' protiv progressiruyushchego obrusheniya*. Moskva: MNIITEP. 40 s.
- Pretlove, A. J.; Ramsden, M.; Atkins, A. G. 1991. Dynamic effects in progressive failure of structures, *International Journal of Impact Engineering* 11(4): 539–546. [http://dx.doi.org/10.1016/0734-743X\(91\)90019-C](http://dx.doi.org/10.1016/0734-743X(91)90019-C)
- STO 008-02495342-2009. *Predotvrashhchenie progressiruyushchego obrusheniya zhelezobetonnykh monolitnykh konstruktсий zdaniy*.
- TSN 31-332-2006. *Zhilye i obshhestvennye vysotnye zdaniya: Territorialnyye stroitelnyye normy g. Sankt-Peterburg*.

Vlassis, A. G.; Izzudin, B. A.; Elghazouli, A. Y.; Nethercot, D. A. 2008. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss – part II: Application, *Engineering Structures* 30(5): 1424–1438.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.08.011>

MODELING METHODOLOGY OF PROGRESSIVE COLLAPSE BY THE EXAMPLE OF REAL HIGH-RISE BUILDINGS

M. Barabash

Abstract

The purpose of the research was to find out several ways to design real buildings with protective measures against progressive collapse. There are no uniform guidelines for choosing the type of finite element able to provide the necessary accuracy of the calculation model taking into account all the main factors affecting the strength and stability of the building. Therefore it is required to develop numerical methods for calculation on progressive collapse of buildings bearing structural elements in case of emergency.

In addition, our task was to present a methodology that allows checking the stability of the building against progressive collapse. By the technique nonlinear analysis on special (emergency) regulations combination of loads and impacts is performed, including permanent and long-term regulatory burden and the impact of hypothetical local fractures bearing structures.

This study was carried out on the high rise apartment complex with underground parking. In the empirical part of the study the main concern was to find out the reasons of progressive collapse of structures, taking into account stepwise assembly, building inspection performed rollover. Also the existing building retail and office complex “Gulliver” with public facilities and parking is considered, where computation was made on the progressive collapse of the upper slab technical floor. The calculation was carried out on plates or emergency landing helicopter crash on the floor slab.

Analysis of the results leads to the following conclusions. To assess the real vitality of the building in an emergency situation, and resistance to progressive collapse it is recommended to count design taking into account physical and geometric nonlinearity and process modeling lifecycle.

Keywords: progressive collapse, life cycle, computer simulation, design elements, nonlinear analysis, stability.

AUKŠTYBINIŲ PASTATŲ PROGRESUOJANČIOS GRIŪTIES MODELIAVIMAS

M. Barabash

Santrauka

Straipsnyje nagrinėjamas aukštybinių pastatų progresuojančios griūties modeliavimas. Pasitelkiant programinę įrangą LIRA-SAPR atliktas kompiuterinis eksperimentas, iliustruojantis pastato griūtį veikiant įvairiems veiksniams.

Reikšminiai žodžiai: progresuojanti griūtis, gyvavimo ciklas, kompiuterinis modeliavimas, konstrukcijos elementai, netiesiškumas, stabilumas.