

УДК 624.046.5: 69.059.2: 699.88

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КИРПИЧНОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ ПРИ ЗАПРОЕКТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ (ВЗРЫВ БЫТОВОГО ГАЗА ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЯ)

РОМАШКИНА М. А., аспирантка,

Кафедра компьютерных технологий строительства, Институт аэропортов, Национальный авиационный университет, просп. Космонавта Комарова, 1, 03058, Киев, Украина, тел. +38 (095) 931-52-50, e-mail: [romashkina.1989@gmail.com](mailto:romashkina.1989@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7158-4037.

**Аннотация.** *Цель.* В последние годы возникла острая необходимость в исследованиях, связанных с проблемой конструктивной безопасности зданий и сооружений. Исследователь должен дать характеристику неразрушаемости несущей системы при эксплуатации зданий и сооружений, а так же решить проблему живучести сооружений при внезапных запроектных воздействиях. Одно из таких воздействий – взрыв бытового газа внутри помещений. Отказы отдельных элементов конструкций при взрыве бытового газа способны спровоцировать прогрессирующее обрушение здания. В данной статье приведены результаты обследования технического состояния несущих конструкций и анализ конечно-элементных моделей 5-ти этажного кирпичного жилого дома по ул. Маковой, г. Стаханов, Луганская обл., после взрыва бытового газа. Характер разрушения рассматриваемого жилого дома, в соответствии с критериями многих строительных норм, можно отнести к прогрессирующему обрушению. *Методика.* Численные исследования выполнялись методом конечных элементов с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР 2014». При обработке полученных результатов натурных и численных исследований использовался анализ сравнительных характеристик. *Результаты.* Проведен анализ и обобщение результатов обследования реальной аварийной ситуации – взрыва газа для кирпичного жилого дома. Разработаны конечно-элементные модели, которые позволили проанализировать разрушение несущих конструкций жилого кирпичного дома в запредельном состоянии вызванное взрывом бытового газа. *Научная новизна.* Предложены конечно-элементные модели для оценки взрывоустойчивости и оценки степени поврежденности жилого кирпичного здания, которые использованы для ретроспективного нелинейного анализа реального кирпичного здания, в котором произошел взрыв бытового газа. *Практическая значимость.* Предложенные конечно-элементные модели могут быть использованы при текущем определении технического состояния строительных конструкций взрывоопасных объектов, а также при прогнозировании ущерба от последствий внутренних взрывов на объектом, местном и региональном уровнях. Предложена вычислительная технология, которая в дальнейшем можно использовать для численных экспериментов с различными параметрами, влияющими на силу и место взрыва.

**Ключевые слова:** конечно-элементная модель; взрыв бытового газа; прогрессирующее обрушение; запроектные воздействия; конструктивная безопасность

## ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЦЕГЛЯНОГО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ ПРИ ЗАПРОЕКТНИХ ВПЛИВАХ (ВИБУХ ПОБУТОВОГО ГАЗУ ВСЕРЕДИНІ ПРИМІЩЕННЯ)

РОМАШКІНА М. А., аспірантка,

Кафедра комп'ютерних технологій будівництва, Інститут аеропортів, Національний авіаційний університет, просп. Космонавта Комарова, 1, 03058, Київ, Україна, тел. +38 (095) 931-52-50, e-mail: [romashkina.1989@gmail.com](mailto:romashkina.1989@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7158-4037.

**Анотація.** *Мета.* В останні роки виникла гостра необхідність у дослідженнях, пов'язаних з проблемою конструктивної безпеки будівель та споруд. Дослідник повинен дати характеристику витривалості несучої системи при експлуатації будівель і споруд, а так само вирішити проблему живучості споруд при раптових запроектних впливах. Один з таких впливів - вибух побутового газу всередині приміщень. Відмови окремих елементів конструкцій при вибуху побутового газу здатні спровокувати прогресуюче обвалення будівлі. У даній статті наведені результати обстеження технічного стану несучих конструкцій та аналіз скінчено-елементних моделей 5-ти поверхового цегляного житлового будинку по вул. Маковой, м. Стаханов, Луганська обл., після вибуху побутового газу. Характер руйнування цього житлового будинку, відповідно до критеріїв багатьох будівельних норм, можна віднести до прогресуючого обвалення. *Методика.* Чисельні дослідження виконувалися методом скінчених елементів з використанням програмного комплексу «ЛІРА-САПР 2014». При обробці отриманих результатів натурних і чисельних досліджень використовувався аналіз порівняльних характеристик. *Результати.* Проведено аналіз та узагальнення результатів обстеження реальної аварійної ситуації - вибуху газу цегляного житлового будинку. Розроблено кінцево-елементні моделі, які дозволили проаналізувати руйнування несучих конструкцій житлового цегляного будинку в позамежному стані викликаний вибухом побутового газу. *Наукова новизна.* Запропоновано кінцево-

елементні моделі для оцінки вибухостійкого та оцінки ступеня пошкодження житлового цегляного будинку, які були використані для ретроспективного нелінійного аналізу реальної цегляної будівлі, в якій стався вибух побутового газу. **Практична значимість.** Запропоновані скінчено-елементні моделі можуть бути використані при поточному визначенні технічного стану будівельних конструкцій вибухонебезпечних об'єктів, а також при прогнозуванні збитку від наслідків внутрішніх вибухів на об'єктовому, місцевому та регіональному рівнях. Запропоновано технологія розрахунку, яку в подальшому можна використовувати для чисельних експериментів з різними параметрами, що впливають на силу і місце вибуху.

**Ключові слова:** кінцево-елементна модель; вибух побутового газу; прогресуюче обвалення; запроектні впливи; конструктивна безпека

## NUMERICAL RESEARCH OF STRESS STRAIN STATE FOR THE BRICK RESIDENTIAL BUILDING IN CASE OF UNEXPECTED LOAD BEYOND DESIGN VALUE (EXPLOSION OF DOMESTIC GAS INSIDE THE PREMISES)

ROMASHKINA M. A., *postgraduate student,*

Department of Computer Technology, Institute of Airports, National Aviation University, Kosmonavta Komarova 11, 03058, Kyiv, Ukraine, тел. +38 (095) 931-52-50, e-mail: romashkina.1989@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7158-4037.

**Summary. Purpose.** In recent years, there is a potential need for further research in constructional safety of buildings and structures. The researcher should describe indestructibility of the bearing system in maintaining buildings and structures, solve the problem of survivability of structures during unexpected load beyond design value. One of such loads is the explosion of domestic gas inside the premises. Damages in separate elements of structures during domestic gas explosion could provoke progressive collapse of the structure. This paper presents results of examination of the technical state of building structures and evaluation of finite element models of 5-storey brick residential building located in Makerova Street, Stakhanov, Luganskaya oblast (region) after exploding of domestic gas. According to many building codes, actual damage of the structure may be described as progressive collapse. **Methodology.** Numerical analyses were carried out by finite element method with LIRA-SAPR 2014 software. In processing of results of field observation and numerical investigations, comparative analysis on the features was applied. **Results.** Evaluation and summary of results of real emergency case – gas explosion in brick residential building. The paper produces FE models that enable you to evaluate the damage of bearing structures of brick residential building in out-of-limit state caused by domestic gas explosion. **Scientific novelty.** The author suggests FE models for evaluation of explosion stability and evaluation of the damage rate for brick residential building. These models are used for retrospective nonlinear analysis of real brick building where domestic gas was exploded. **Practical implications.** Suggested FE models may be applied for current structural survey of explosion-hazardous premises. They also may be used for predicting losses from internal explosions for the object, city and region. The author presents computation technology that may be further used for numerical experiments with different parameters that affect the strength and location of explosion.

**Keywords:** finite element model; exploding of domestic gas; progressive collapse; load beyond design value; constructional safety

### Введение

Аварии зданий, вызванные взрывами бытового газа, происходят очень часто. Как правило, причиной аварий в этих случаях является человеческий фактор. Согласно информационно-аналитической справке о чрезвычайных ситуациях (ЧС) в Украине, которые произошли в течение 2014 зарегистрировано 143 ЧС, из них 74 - техногенного характера. В 2014 году зарегистрировано увеличение количества погибших в ЧС связанных со взрывами, в том числе бытового газа (в 2014 году в ЧС погибло 152 человека против 99 - в 2013 году, увеличение на 54%), ЧС вследствие внезапного разрушения зданий и сооружений, (10 погибших в 2014 году против четверых 2013 году, увеличение в 2,5 раза).

В настоящее время чрезвычайно актуальна проблема обеспечения механической

(конструктивной) безопасности и существующих, и проектируемых строительных конструкций. В тех случаях, когда возникают непредусмотренные проектом (запроектные) воздействия, возможно несколько вариантов поведения сооружения – возникающие дополнительные деформации и напряжения в элементах сооружения либо не повлекут за собой отказ несущих элементов, либо повлекут частичное или полное разрушение сооружения. Нормы многих стран обязывают выполнять расчет и проектирование зданий и сооружений с учетом возникновения возможных запроектных воздействий, которые могут повлечь за собой прогрессирующее обрушение.

### Анализ публикаций

Термин "прогрессирующее обрушение" и формулировка проблемы защиты от него панельных

зданий появились в 1968 г. в докладе комиссии, расследовавшей причины известной аварии 22-этажного панельного жилого дома «Роунан Пойнт» в Лондоне [1]. Исследованию этой проблемы посвящены работы многих ученых (Алмазов В. О. [2], Барабаш М. С. [3], Городецкий А. С. [4], Мутука Кяло, Расторгуева Б.С. Плотникова А. И., Хуснутдинов Д. З. [5], Шапиро Г. И., Гурьева В. В., Эйсмана Ю. А. [6], Powell G. [7], Gilmour J.R. и Viridi K. S. [8], Leyendecker E. V. и Ellingwood B. R. [9], McGuire, W. [10] и др.).

Следует заметить, нормами разных стран неоднозначно трактуется термин «прогрессирующее обрушение»:

American Society of Civil Engineers (ASCE) [11] - относит к прогрессирующему обрушению распространение начального местного разрушения от элемента к элементу, которое приводит к разрушению всего сооружения или непропорционально большей его части;

New York City Building Code [12] - разрушение конструкций, которое распространяется вертикально более чем на три этажа, а горизонтально площадью более 100 м<sup>2</sup> или 20% площади здания (меньшее из двух значений);

General Services Administration (GSA) [13] - ситуация, когда местное разрушение основного элемента конструкции приводит к разрушению прилегающих элементов, что в дальнейшем влечет дополнительные разрушения;

British Standard BS [14] - местное разрушение, превышающее 100 м<sup>2</sup> или 15% площади перекрытия или покрытия соответствующего этажа и одного прилегающего этажа, расположенного над или под ним;

National Building Code of Canada (NBCC) [15] - распространение начального местного разрушения от элемента к элементу, что в результате завершается разрушением конструктивной системы;

Московские городские строительные нормы (МГСН) [16] - разрушение несущих конструкций здания в пределах нескольких этажей и до 20% площади одного этажа, возникающее вследствие местного разрушения.

Государственные строительные нормы (ДБН) [17] – обрушение здания вследствие локального разрушения части несущих конструкций на одном или нескольких этажах.

Очевидно, отличаются не только определения прогрессирующего обрушения, но и допустимые его размеры.

Аварийные воздействия, приводящие к прогрессирующему обрушению, могут быть природного и антропогенного (в том числе техногенного) характера. 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. Так как предусмотреть все сценарии прогрессирующего обрушения невозможно, 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 и наиболее вероятным сценарием возникновения аварии.

Следует отметить, что согласно рекомендациям работы [18], расчет зданий и сооружений на устойчивость прогрессирующему обрушению следует выполнять для объектов, разрушение и повреждение которых может привести к существенным социальным, экологическим и экономическим последствиям (I и II категории ответственности). Это связано с тем, что такие расчеты довольно трудоемки, а мероприятия, связанные с повышением сопротивления здания прогрессирующему разрушению, могут привести к удорожанию возводимой конструкции. Расчет здания на устойчивость прогрессирующему разрушению выполняется на особое сочетание нагрузок и воздействий, включающее постоянные и временные длительные нагрузки, а также воздействие гипотетических локальных разрушений несущих конструкций.

### Основная часть

В данной работе рассмотрено здание массового строительства (III категории ответственности), на фактическое аварийное воздействие, которое (в соответствии с критериями многих норм) можно отнести к прогрессирующему обрушению. Решить задачи, связанные с прогрессирующим разрушением строительных конструкций, экспериментальными методами не представляется возможным. Развитие вычислительной техники и численных методов расчета позволяет решать подобные задачи с помощью методов математического моделирования. В данной работе предложены конечно-элементные модели и подходы, которые можно использовать для прогнозирования НДС конструкций при аналогичных запроектных воздействиях.

Рассмотрен случай взрыва бытового газа, произошедшего в одной из секций здания жилого кирпичного дома в 2012 году в г. Стаханов (Луганская обл.). Проведенные после взрыва здания обследования позволили сделать выводы об ошибках в проектных решениях, которые и привели к прогрессирующему обрушению. Для проверки этих выводов были составлены конечно-элементные модели и выполнены расчеты здания на взрывное воздействие, которые подтвердили правильность сделанных предположений, позволили объяснить характер разрушения, найти слабые места конструкции и сделать предложения по реконструкции разрушенного здания.

Остановимся на анализе конструктивного решения здания: жилой дом был построен в зоне

влияния горных подработок. Процесс сдвижения горных пород и опасных деформаций в зоне строительства окончен в 1974 г, а построено и введено в эксплуатацию здание в 1993 году.

Стены здания выполнены из кирпичной кладки без армирования (кладка из силикатного кирпича М 200, выполнена на растворе М 25). Толщина наружных стен 510 мм, внутренних — 380 мм. Перегородки гипсопркатные. Перекрытия, лестничные марши и площадки сборные железобетонные. Крыша здания вальмовая. Стропильные конструкции крыши здания металлические. Кровля крыши выполнена из асбестоцементных листов. Фундаменты здания сборные железобетонные, выполнены из бетонных стеновых блоков и железобетонных фундаментных плит. При строительстве здания применены плиты перекрытия с круглыми пустотам.

Сведений о состоянии строительных конструкций до 2012 года нет. До произошедшей аварии отказов несущих строительных конструкции здания не

выявлено. Здание находилось в удовлетворительном состоянии.

Конструктивная схема здания выполнена с продольными несущими стенами и поэтажными монолитными поясами. Следует особо отметить, что газификация здания была выполнена после ввода здания в эксплуатацию и по-видимому этим можно объяснить, что монолитный пояс был рассчитан на неравномерное проседание основания, а вероятность взрыва газа в проекте не рассматривалась. Вследствие чего не было предусмотрено надежное соединение плиты перекрытия и монолитного пояса.

Четырнадцатого декабря 2012 года в 18 ч. 18 минут произошло частичное обрушение и разрушение несущих конструкций 2,3,4 этажей блок-секции №3 жилого дома, в результате взрыва, происшедшего на 3 этаже в осях 4-5 между осями Б-Г (рис. 1), без дальнейшего горения. Обрушились перекрытия над вторым и третьим этажами. Вышла из вертикальной плоскости наружная стена по оси Г. Обрушенные конструкции упали на перекрытие второго этажа.

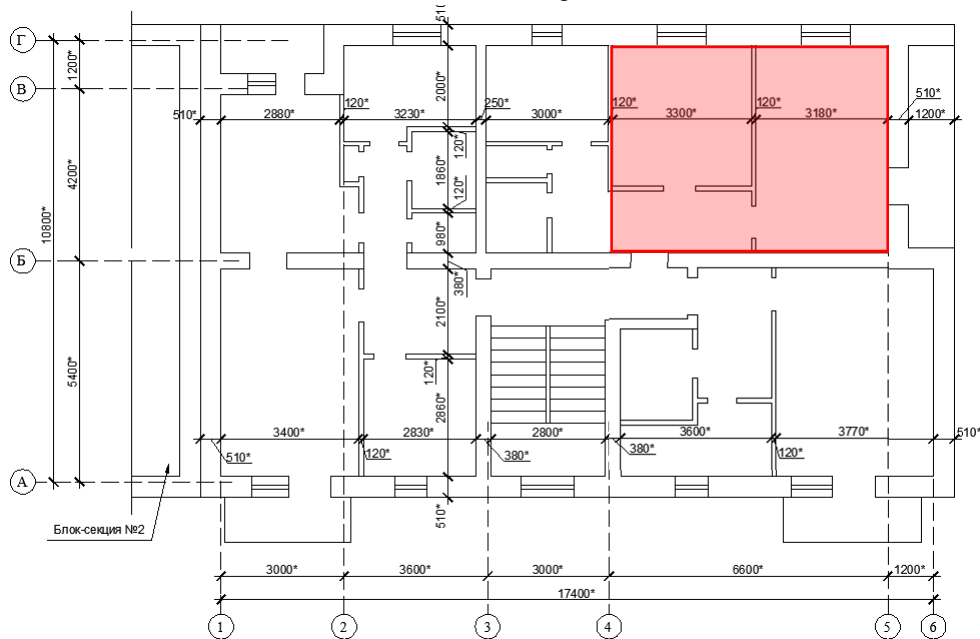


Рис. 1. План третьего этажа здания блок-секции №3 с указанием места взрыва (Луганская обл., г. Стаханов, ул. Макарова, 3а.) / Plan of the third floor of the building, block-section No.3 with location of explosion (3a Makerova street, Stakhanov city, Luganskaya oblast)

Результаты обследования строительных конструкций здания жилого дома после взрыва и обрушения строительных конструкций свидетельствуют о том, что эпицентр взрыва находился на третьем этаже в осях 4-6 между осями Б-Г. Взрыв внутри здания привел к обрушению строительных конструкций, изменению расчетной схемы и нарушению пространственной жесткости блок-секции №3 жилого дома. Повреждены наружные и внутренние стены здания, междуэтажные перекрытия. Обрушены междуэтажные перекрытия в осях Б-В между осями 4-5 над вторым и третьим этажами, а так же

железобетонные плиты лоджии. В результате взрыва стены здания образовались выпуклости стен по оси Г.

Взрывной волной выбило двери, оконные переплеты, стекла в окнах здания. От динамического воздействия взрыва образовались трещины во внутренней стене здания с первого по пятый этаж, трещины в междуэтажных перекрытиях в осях А-Б. Выявлены трещины в сопряжениях между конструкциями лестничных маршей и кирпичными стенами лестничной клетки блок-секции №3, что свидетельствует о деформировании и снижении пространственной жесткости здания (Рис. 2,3).



*Рис 2 - Деформирована и разрушена кладка наружной несущей стены в осях 6-1 по оси Г блок секции №3 жилого дома №3а с образованием трещин с четвертого по второй этаж. Выбиты стекла в окнах блок секции №3 жилого дома №3а / Deformed and damaged brickwork in exterior bearing wall in axes 6-1 along axis Г block-section No.3 in residential building No.3a with crack formation from the fourth up to the second floor. Broken glass in windows of block-section No.3 in residential building No.3a*



*Рис 3. –Обрушены перекрытия в осях 4/1 — 5 между осями Б-Г над вторым и третьим этажом Трещины в углах здания шириной раскрытия до 150 мм. Разрушен защитный слой бетона и оголена арматура в междуэтажных монолитных поясах / Failure in floor slabs in axes 4/1 — 5 between axes Б-Г above the second and the third floors. Cracks in corners of the structure with crack propagation up to 150 mm. Damaged concrete cover and bared rebars in inserted monolithic floors*

Конечно-элементные модели и результаты расчетов: для оценки НДС здания в стадии эксплуатации до взрыва и после взрыва было разработано несколько конечно-элементных моделей в программном комплексе (ПК) Лира-САПР. Данные о прочностных и геометрических характеристиках элементов сооружения взяты из результатов обследований. На рис. 4, а) показана конечно-элементная модель для исследования НДС здания в стадии эксплуатации до взрыва, а на рис. 4, б) - для исследования НДС здания после взрыва.

Расчет модели рис. 4, а) показали, что здание жилого дома запроектировано со значительным

запасом прочности. Так, например, процент использования несущей способности простенков — 33%. Наличие монолитных поясов значительно повысило пространственную жесткость здания.

Расчет модели рис. 4, б) показали, что снижена несущая способность стен и плит перекрытия в месте обрушения строительных конструкций в осях 3-6 между осями Б-Г от 40 до 80%. В расчетной схеме после взрыва в стенах по оси Г в осях 4-6 и по оси 5 в осях Б-Г в уровне 2-4 этажей напряжения в кладке превышают нормативные.

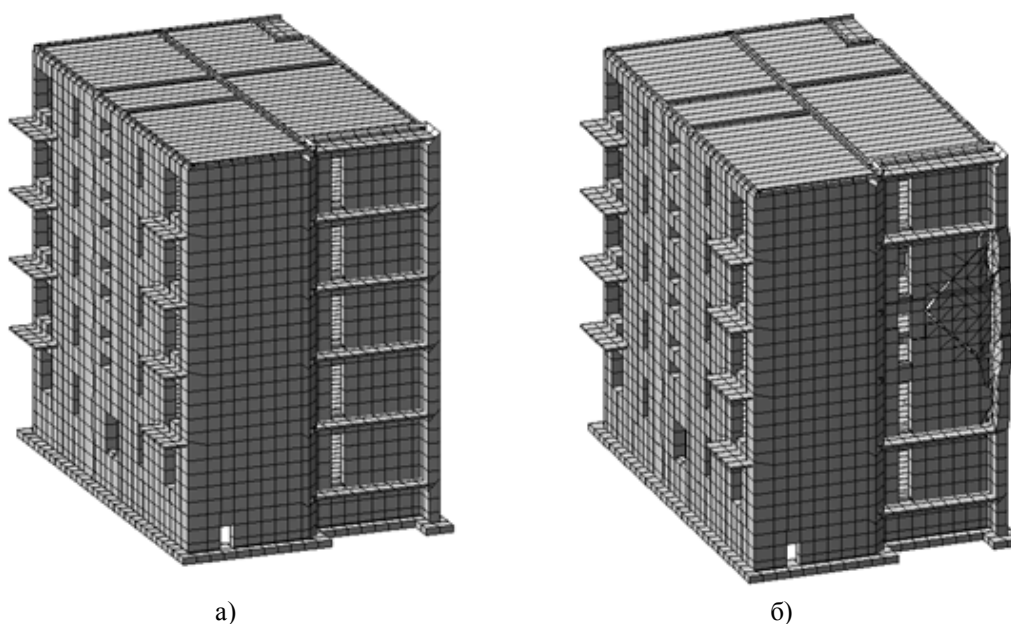


Рис. 4. Конечно-элементная модель здания жилого дома в г. Стаханов по ул. Маковой, 3а, а) до взрыва, б) после взрыва / FE model for residential building located in 3a Makovera street, Stakhanov city a) before explosion, b) after explosion

Анализ характера повреждений сооружения после взрыва позволил установить, что были допущены ошибки в конструктивном решении соединения плит перекрытия с монолитным поясом и несущими стенами. Для проверки предположения о том, что именно отсутствие надежного соединения плит

перекрытия с монолитным поясом стало причиной характера разрушения (взрывной волной были отодвинуты стены и плиты перекрытия, лишенные опор, упали на нижние этажи), была составлена конечно-элементная модель, схема которой показана на рис.5.

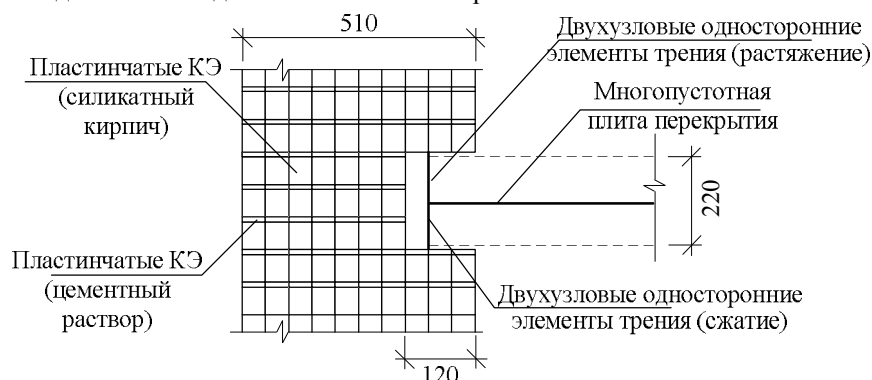


Рис. 5. Конечно-элементная модель кирпичного простенка / FE model of brick pier

По всей ширине обрушения плит перекрытия характер разрушения практически одинаков. Это позволило составить плоскую модель кирпичного простенка в месте взрыва. Кладка моделировалась пластинчатыми конечными элементами (КЭ) с учетом перевязки горизонтальными швами. Плиты перекрытия моделировалась стержневыми КЭ. В узле опирания многopустотной плиты на кирпичную наружную стену моделировалась ниша (глубина опирания плиты 110 мм, 20 мм шов). Между плитой и монолитным поясом – растворный слой толщиной 12 мм. Связь между ними осуществляется только за счет сил трения. Для моделирования односторонней связи между плитой перекрытия и монолитным поясом были введены парные КЭ трения, одни из которых работали на сжатие, а другие на

поясом использованы специальные элементы КЭ №264 – двухузловые односторонние элементы трения, которые вводятся на участках контакта плиты перекрытия и монолитного пояса, тем самым дискретизируя растворный слой между поверхностями контакта. В модели зона контакта плиты перекрытия с монолитным поясом при различных сочетаниях нагрузки может раскрываться и закрываться. Двухузловые односторонние элементы трения КЭ №264 работают либо на сжатие, либо на растяжение, пока нагрузка не достигнет предельного уровня. Что бы обеспечить постоянную работу элементов при любых условиях нагружения на участках контакта плиты перекрытия и растяжение. Если возникающие в растворе напряжения превышают расчетное сопротивление, то

нарушается совместная работа стены и плиты перекрытия. В данном случае именно состояние контактной зоны определило характер разрушения. Контактное трение зависит от нормальных сил взаимодействия, поэтому в данной задаче учитывался характер и история загрузения, а решение строилось на основе метода пошагового анализа. Такой подход позволяет конструктивную нелинейность заданной системы, то есть задачу с односторонними связями и трением между взаимодействующими телами, свести к рассмотрению самого нелинейного дискретного контактного слоя.

Задача решалась в физически нелинейной постановке (с учетом реальных диаграмм работы материалов). При формировании такой модели возникают сложности, связанные с недостатком информации о физических свойствах материалов каменной кладки и кладочных растворов. Определение модуля упругости и коэффициента Пуассона строительными нормами и ГОСТами для растворов не предусмотрено. Поэтому при задании жесткостных характеристик раствора кладки использовались данные, приведенные в статье [19]. В рассматриваемой модели многопустотная плита перекрытия представлена стержнем эквивалентной жесткости.

О величине нагрузки на простенок во время взрыва: в работах Комарова [20,21] представлены математические модели и уравнения, описывающие избыточное давление при внутренних дефлаграционных взрывах с учетом того, что при математическом описании процесса взрывного горения в промышленных и гражданских зданиях необходимо исходить из того, что допустимые

уровни взрывных нагрузок внутри зданий не должны превышать  $P_{доп}=10-15\text{кПа}$  (при давлении превышающем  $P_{доп}$ , основные строительные конструкции большинства зданий разрушаются).

В расчетной модели была принята минимальная из этого диапазона равномерно распределённая нагрузка величиной 10 кПа.

Расчет на этой модели дал отклонение стены от вертикали 160мм, а в результате обследования установлено, что в результате взрыва стены здания по оси Г сдвинулись с монолитных поэтажных поясов на величину до 150 мм, т. е. плиты перекрытия лишились опор (площадка опирания - 120 мм). В месте взрыва возникло повреждение каменной кладки - трещины отрыва кирпичей по растворным швам. Таким образом, в результате расчета была получена картина разрушения, ставшая причиной возникновения прогрессирующего обрушения. Это подтверждает и правильность предположения о причине такого характера разрушения, и о адекватности составленной конечно-элементной модели.

Некоторые плиты после взрыва остались частично опертыми по краю. Сменился характер их работы (сжатый в проектом положении слой плиты оказался растянутым). Это повлекло к частичному разрушению плит, характер разрушения виден на рис.6. Для исследования НДС таких плит была составлена конечно-элементная модель, показанная на рис. 7. Многопустотная плита перекрытия моделировалась оболочечными КЭ. Арматурные каркасы, верхняя и нижняя сетка в плите моделировались стержневыми КЭ.



Рис. 6. Обрушены перекрытия в осях 4/1 — 5 между осями Б-Г над вторым и третьим этажом. Повреждены плиты в осях 4 - 4/1 между осями Б-Г над вторым и третьим этажом и в осях 4/1 — 5 между осями Б-Г над первым этажом / Failure in floor slabs in axes 4/1 — 5 between axes Б-Г above the second and the third floors. Damaged slabs in axes 4 - 4/1 between axes Б-Г above the second and the third floors and in axes 4/1 — 5 between axes Б-Г above the first floor.

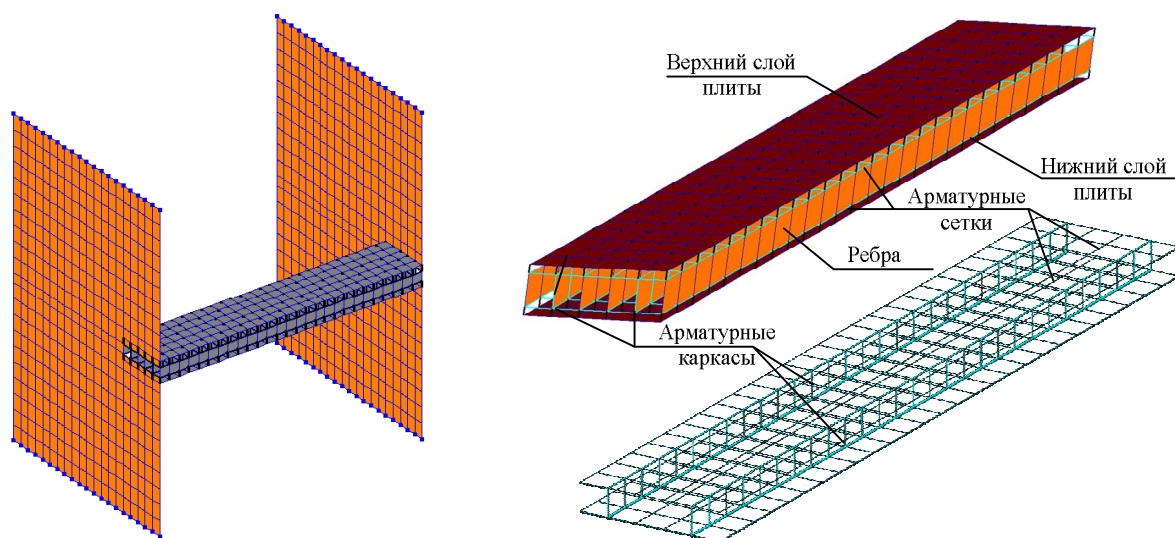


Рис. 7. Конечно-элементная модель многопустотной плиты перекрытия / FE model of hollow-core floor slab

Задача решалась в физически нелинейной постановке. Изменения характера работы плиты от нормального эксплуатационного к аварийному смоделирован с использованием постпроцессора МОНТАЖ ПК ЛИРЫ-САПР.. На первой стадии монтажа монтировалась вся КЭ модель, приложена постоянная, длительная и кратковременная нагрузки. На второй стадии монтажа частично

демонтировались элементы опоры плиты перекрытия, приложена взрывная нагрузка. На третьей стадии монтажа – приложена нагрузка от веса обрушившейся плиты перекрытия.

Характер деформирования и разрушения конечно-элементной модели плиты перекрытия полученный в результате расчета соответствует реальной картине разрушения многопустотной плиты.

### Выводы

Проведен анализ и обобщение результатов обследования реальной аварийной ситуации – взрыва газа для кирпичного жилого дома №3а по ул. Макерова, г Стаханов. Сравнение картины трещин, полученных в результате численного моделирования с фактическим расположением повреждений, позволяет говорить о достоверности математических моделей и предложенной вычислительной технологии, которую в дальнейшем можно использовать для численных экспериментов с

различными параметрами, влияющими на силу и место взрыва.

Выявленное не предусмотренное в проекте нормальное крепление плит перекрытия с монолитным поясом повлекло за собой прогрессирующее обрушение. Полное разрушение здания, не произошло лишь благодаря поэтажным монолитным поясам. Монолитные пояса фактически обеспечивают жесткость здания и удерживают разрушенную часть здания от дальнейшего обрушения.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Report of the Inquiry into the Collapse of Flats at Ronan Point, Caning Town; MSO, 1968.  
[http://engagedscholarship.csuohio.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1021&context=enec\\_facpub](http://engagedscholarship.csuohio.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1021&context=enec_facpub)
2. Алмазов В. О. Проблемы прогрессирующего разрушения / О. В. Алмазов // Научно-технический журнал “Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс”, 2009. – № 6 – С. 3-10.  
V. O. Almazov. The problems of progressive collapse / V. O. Almazov // Scientific and technical journal “State University – Educational-Science-Production Complex”, 2014. – No.6 – p. 3-10.  
<http://www.gu-unpk.ru/public/file/archive/6-66.pdf>
3. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография/ Мария Сергеевна Барабаш. – К.: Изд-вл «Сталь», 2014. – 301 с.
4. Городецкий А. С. Некоторые аспекты расчета зданий на устойчивость к прогрессирующему разрушению / А. С. Городецкий, М. С. Барабаш // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2009. – №. 50. – С. 157 - 162.  
<http://www.liraland.ru/books/12/1676/>
5. Расторгуев Б. С. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях: учебное пособие / Б. С. Расторгуев, А. И. Плотников, Д. З. М. Barabash. Computer simulation of life cycle of the structures: Monograph/ Maria Barabash. – К.: Publ. ‘Steel’, 2014. – 301 p.  
<http://er.nau.edu.ua:8080/handle/NAU/12273>



Хуснутдинов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 152 с.

B. Rastorguev. Design of buildings and structures in accidental explosions: tutorial / B. Rastorguev, A. Plotnikov, D. Khusnutdinov. – М.: Publ. Association of building institutes, 2007. – 152 p.

<http://www.zodchii.ws/books/info-560.html>

6. Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий. Ю. М. Стругацкий, Г. И. Шапиро, Ю.А. Эйсман. Москомархитектуры. М., 1999.

Recommendations on preventing progressive collapse in large-panel structures. Y. Strugatsky, G. Shapiro, Y. Ejsman. Moscow City Architecture Committee. М., 1999.

<http://s-doc.ru/rekomendacii-76>

7. Powell, Graham. Progressive Collapse: Case Studies Using Nonlinear Analysis. SEAOC Annual Convention, Monterey, August 2004.

<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40753%28171%2921>

8. Gilmour J.R. and Virdi K.S. Numerical modelling of the progressive collapse of a framed structures as a result of impact or explosion. 2nd int. PhD. Symposium in civil engineering, Budapest 1998 Kaewkulchai G. and Williamson E.B. Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis, Journal "Computer and Structures" 82 (2004), Pp. 639-651.

<http://fib.bme.hu/proceedings/gilmour.pdf>

9. Leyendecker, E.V. and Ellingwood, B.R., 1977, "Design Methods for Reducing the Risk of Progressive Collapse in Buildings," NBS Building Science Series 98, National Bureau of Standards, Washington, DC.

[http://books.google.com.ua/books/about/Design\\_methods\\_for\\_reducing\\_the\\_risk\\_of.html?id=g9\\_HRXBTx2EC&redir\\_esc=y](http://books.google.com.ua/books/about/Design_methods_for_reducing_the_risk_of.html?id=g9_HRXBTx2EC&redir_esc=y)10. McGuire, W., 1974, "Prevention of Progressive Collapse," Proceedings of the regional Conference on Tall Buildings, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

11. American Society of Civil Engineers (ASCE), (2005), —Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, I SEI/ASCE 7-05, Reston, Va

<http://dwg.ru/dnl/9354>

12. New York City Building Code, (1998), —Resistance to Progressive Collapse Under Extreme Local Loads

<http://gisceu.net/PDF/U580.pdf>

13. General Services Administration (GSA), (2003), —Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects

<http://www.engr.psu.edu/ae/thesis/portfolios/2008/dsfl39/Documents/GSA.pdf>

14. British Standards Institute, (2000), —Structural Use of Steelwork in Building, Part 1: Code of Practice for Design - Rolled and Welded Sections, I BS 5950-1:2000

<http://ces-legenda.com/wp-content/uploads/2013/09/BS-5950-Part-1-Structural-use-of-steelwork-in-building1.pdf>

15. National Research Council of Canada, (1975, 1977, 1980, 1990, 1995), —National Building Code of Canada, I Ottawa, Canada

*Статья рекомендована к публикации д-ром. д-ром. техн. наук, проф. М. С. Барабаш (Украина)*

<http://people.scs.carleton.ca/~roth/iit-publications-iti/docs/NRC-45866.pdf>

16. Московские городские строительные нормы. Многофункциональные высотные здания и комплексы: МГСН 4.19-05. – [Введен в действие с 28-12-2005-]. – М., 2005. – 71 с. – (Московские городские строительные нормы).

Moscow city building code. Multifunction high-rise buildings and complexes: MGSN 4.19-05. – [valid from 28-Dec-2005-]. – М., 2005. – 71 с. – (Moscow city building code).

[http://gostrf.com/norma\\_data/46/46475/index.htm](http://gostrf.com/norma_data/46/46475/index.htm)

17. Проектирование высотных жилых и гражданских сооружений: ДБН В.2.2-24:2009. – [Введен в действие с 01-09-2009]. – К.: Минрегионстрой Украины, 2009. – 103 с. – (Государственные строительные нормы Украины).

Design of high-rise residential and civil buildings: DBN V.2.2-24:2009. – [valid from 01-Sept-2009]. – К.: Minregionstroy of Ukraine, 2009. – 103 p. – (State building codes of Ukraine).

[http://minregion.gov.ua/attachments/files/bydivnitsstvo/tehnichne-regulyuvannya/normuvannja/22\\_24\\_2009.pdf](http://minregion.gov.ua/attachments/files/bydivnitsstvo/tehnichne-regulyuvannya/normuvannja/22_24_2009.pdf)

18. Рекомендации по защите жилых зданий с несущими кирпичными стенами при чрезвычайных ситуациях. – М.: Москомархитектура, 2002. – 18с.

Recommendations on protection of civil structures with bearing brick walls in emergencies. – М.: Moscow City Architecture Committee, 2002. – 18p.

<http://standartgost.ru/g/pkey-14294845695/Рекомендации>

19. Пангаев В. В. О деформативных характеристиках цементных кладочных растворов / Пангаев В. В., Сердюк В. М. //Изв. вузов. Строительство, 2004.– №9. –С. 110 - 113.

V. Pangaev. About deformation properties of cement mortars / V. Pangaev, V. Serdyuk. //Publ. Construction, 2004.– No.9. –p. 110 - 113.

[http://ecatalog.vlgatech.net/cgi-bin/irbis64r\\_13/cgiirbis\\_64.exe?LNG=&Z21ID=&I21DBN=STATY&P21DBN=STATY&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=U=&S21STR=624.012.2](http://ecatalog.vlgatech.net/cgi-bin/irbis64r_13/cgiirbis_64.exe?LNG=&Z21ID=&I21DBN=STATY&P21DBN=STATY&S21STN=1&S21REF=10&S21FMT=fullwebr&C21COM=S&S21CNR=20&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=U=&S21STR=624.012.2)

20. Комаров А. А. Прогнозирование динамических нагрузок при аварийных взрывах в помещениях. Журнал «Механизация строительства», №6, 2000. С.21-26.

A. Komarov. Prediction of dynamic loads in emergencies with explosions inside premises. 'Mechanization in construction' journal, No.6, 2000. p.21-26.

<http://tekhnosfera.com/prognozirovanie-nagruzok-ot-avariynyh-deflagratsionnyh-vzryvov-i-otsenka-posledstviy-ih-vozdeystviya-na-zdaniya-i-sooruzh>

21. Комаров А. А. Моделирование аварийных выбросов взрывоопасных веществ в помещении / А. А. Комаров Е.В. Бузаев, Г.В. Васюков, Р.А. Загуменников // Журнал «МГСУ», 2014. - №10. - С.132-140.

A. Komarov. Modeling of accidental releases of explosive substances in the room / A. Komarov, E. Buzaev, G. Vasiukov, R. Zagumennikov // MGSU 'journal, 2014. – No.10. - p.132-140.

<http://vestnikmgsu.ru/files/archive/issues/2014/10/ru/14.pdf>

*техн. наук, проф. А. С. Городецким (Украина);*

Поступила в редколлегию 01.04.2015