

International Journal for
Computational Civil and Structural Engineering

(Международный журнал по расчету гражданских и промышленных конструкций)

Volume 12, Issue 1

2016

EXECUTIVE EDITOR

Vladimir I. Travush, Professor,
Vice-President of Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences
24, Ulitsa Bolshaya Dmitrovka, 107031, Moscow, Russia

EDITOR-IN-CHIEF

Vladimir N. Sidorov, Professor
Department of Advanced Mathematics
and Structural Mechanics
Moscow Institute of Architecture (State Academy)
11/4, Building 4, Ulitsa Rozhdestvenka, Moscow,
107031, Russia

EDITORIAL DIRECTOR

Valery I. Telichenko, Professor,
The First Vice-President of Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences
24, Ulitsa Bolshaya Dmitrovka, 107031, Moscow, Russia

MANAGING EDITOR

Nadezhda S. Nikitina, Professor
Director of ASV Publishing House
26, Yaroslavskoe Shosse, 129337 Moscow, Russia

TECHNICAL EDITOR

Taymuraz B. Kaytukov, Associate Professor
Research & Educational Center
of Computational Simulation, National Research
Moscow State University of Civil Engineering
26, Yaroslavskoe Shosse, 129337 Moscow, Russia

ASSOCIATE EDITORS

Pavel A. Akimov, Professor
Executive Scientific Secretary of Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences;
Scientific Research Center "STADYO";
National Research Moscow State University
of Civil Engineering;
24, Ul. Bolshaya Dmitrovka, 107031, Moscow, Russia

Alexander M. Belostotsky, Professor
Scientific Research Center "STADYO";
National Research Moscow State University
of Civil Engineering;
8th Floor, 18, ul. Tretya Yamskogo Polya,
125040, Moscow, Russia

Vladimir Belsky, Ph.D.
Abaqus Inc.,
Pawtucket, RI 02860,
1080 Main Street, USA

Mikhail Belyi, Professor
Abaqus Inc.,
Pawtucket, RI 02860,
1080 Main Street, USA

Vitaly Bulgakov, Professor
Parametric Technology Corp.,
57 Metropolitan Av.,
Ashland, MA, USA

Gregory P. Panasenko, Professor
Equipe d'Analyse Numerique
NMR CNRS 5585
University Gean Mehnet
23 rue. P.Michelon 42023, St.Etienne, France

Boris E. Pobedria, Professor
Department of Mechanics and Mathematics
Lomonosov Moscow State University
MGU. Mech-Math. Vorobjovy Gory
119899 Moscow, Russia

Leonid A. Rozin, Professor
Department of Structural Mechanics
Peter the Great Saint-Petersburg
Polytechnic University
29, Ul. Politechnicheskaya,
195251 Saint-Petersburg, Russia

ADVISORY EDITORIAL BOARD & REVIEWERS

Robert M. Aloyan, Professor
Ivanovo State Polytechnical
University, 20, Ulitsa 8 Marta,
Ivanovo, 153037, Russia

Vladimir I. Andreev, Professor
National Research Moscow State
University of Civil Engineering,
Yaroslavskoe shosse 26, Moscow,
129337, Russia

Mukhtaritdin M. Batdalov, Professor
Makhachkala Branch of Moscow
Automobile and Road State
Technical University (MADI),
1. Imam Shamil Avenue,
Makhachkala, Russia

Klaus-Jurgen Bathe, Professor
Massachusetts Institute
of Technology
Cambridge, MA 02139, USA

Alexander T. Bekker, Professor
Far Eastern Federal University,
8 Suhanova Street, Vladivostok,
690950, Russia

Jan Buynak, Professor
University of Žilina, 1, Univerzitná,
Žilina, 010 26, Slovakia

Evgeniy M. Chernishov, Professor
Voronezh State University of
Architecture and Civil Engineering,
84, 20 Let Oktyabrya st., Voronezh,
394006, Russia

Victor S. Fedorov, Professor
Moscow State University of Railway
Engineering, 9, Obraztsova Street,
Moscow, 127994, Russia

Sergiy Yu. Fialko, Professor,
Cracow University of Technology
24, Warszawska Street, Kraków,
31-155, Poland

Alexander S. Gorodetsky, Professor
LIRA SAPR Ltd.,
Office 212, 7a Kiyanovsky side street
(pereulok), Kiev, 04053, Ukraine

Vyatcheslav A. Ilyichev, Professor
Russian Academy of Architecture
and Construction Sciences,
24, Ulitsa Bolshaya Dmitrovka,
Moscow, 107031, Russia

Marek Iwański, Professor,
Kielce University of Technology,
7, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego
Kielce, 25 – 314, Poland

Sergey Yu. Kalashnikov, Professor
Volgograd State University of
Architecture and Civil Engineering,
1, Academicheskaya Street,
Volgograd, 400074, Russia

Nikolay I. Karpenko, Professor
Research Institute of Building
Physics, 21, Locomotive Travel,
Moscow, 127238, Russia

Vladimir V. Karpov, Professor
Saint Petersburg State University of
Architecture and Civil Engineering,
4, 2-nd Krasnoarmeiskaya Steet,
Saint Petersburg, 190005, Russia

Galina G. Kashevarova, Professor
Perm National Research Polytechnic
University, 29 Komsomolsky pros.,
Perm, Perm Krai, 614990, Russia

Vitaly I. Kolchunov, Professor
Southwest State University, 94, 50 let
Oktyabrya, Kursk, 305040, Russia

Markus König, Professor
Ruhr-Universität Bochum
150, Universitätsstraße, Bochum,
44801, Germany

Sergey B. Kositsin, Professor
Moscow State University of Railway
Engineering, 9, Obraztsova Street,
Moscow, 127994, Russia

Amirlan A. Kusainov, Professor
Kazakh Leading Academy of
Architecture and Civil Engineering
29, Toraigyrov str., Almaty, Almaty,
050043, Republic of Kazakhstan

Sergey V. Kuznetsov, Professor
Institute for Problems in Mechanics
of the Russian Academy of Sciences,
101-1, Prosp. Vernadskogo, Moscow,
119526, Russia

Vladimir V. Lalin, Professor
Peter the Great Saint-Petersburg
Polytechnic University, 29, Ul.
Politechnicheskaya, St. Petersburg,
195251, Russia

Leonid S. Lyakhovich, Professor
Tomsk State University
of Architecture and Building
2, Solyanaya sq., Tomsk, 634003,
Russia

Rashid A. Mangushev, Professor
Saint Petersburg State University of
Architecture and Civil Engineering,
4, 2-nd Krasnoarmeiskaya Steet,
Saint Petersburg, 190005, Russia

Ilizar T. Mirsayapov, Professor
Kazan State University
of Architecture and Engineering,
1, Zelenaya Street, Kazan, 420043,
Republic of Tatarstan, Russia

Vladimir L. Mondrus, Professor
National Research Moscow State
University of Civil Engineering,
Yaroslavskoe shosse 26, Moscow,
129337, Russia

Nikolai P. Osmolovskii, Professor
Kazimierz Pulaski University
of Technology and Humanities
in Radom, 29, ul. Malczewskiego,
26-600, Radom, Poland

Anatoly V. Perelmuter, Professor
SCAD Soft,
Office 1,2, 3a Osvity street,
Kiev, 03037, Ukraine

Alexey N. Petrov, Professor
Petrozavodsk State University,
33, Lenina Prospect, Petrozavodsk,
185910, Republic of Karelia, Russia

Vladilen V. Petrov, Professor
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov
77 Politechnicheskaya Street,
Saratov, 410054, Russia

Jerzy Z. Piotrowski, Professor
Kielce University of Technology,
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7,
Kielce, 25 – 314, Poland

Chengzhi Qi, Professor
Beijing University of Civil
Engineering and Architecture
1, Zhanlanlu, Xicheng District,
Beijing, China

Nikolaj N. Shaposhnikov, Professor
Moscow State University of Railway
Engineering, 9, Obraztsova Street,
Moscow, 127994, Russia

Eun Chul Shin, Professor
Incheon National University,
(Songdo-dong)119 Academy-ro,
Yeonsu-gu, Incheon, Korea

D.V. Singh, Professor
Vice-Chairman all India Council
for Technical Education,
New Delhi, India

Wacław Szcześniak, Professor
15, Al. Armii Ludowej,
Politechnika Warszawska
Warsaw, Poland

Tadatsugu Tanaka, Professor
Tokyo University, 7-3-1 Hongo,
Bunkyo, Tokyo, 113-8654, Japan

Zbigniew Wojciecki, Professor
Wrocław University of Technology
11 Grunwaldzki Sq., 50-377,
Wrocław, Poland

Askar Zhussupbekov, Professor
Eurasian National University,
5, Munaitpassov street, Astana,
010000, Kazakhstan

INVITED REVIEWERS

Akimbek A. Abdikalikov, Professor, Dr.Sc.,
Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture n.a. N. Isanov
34 Malydybayeva Str., Bishkek, 720020, Biskek, Kyrgyzstan

Vadim K. Akhmetov, Professor, Dr.Sc.
National Research Moscow State University of Civil Engineering
26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia

Ján Čelko, Professor, PhD, Ing.
University of Žilina; Univerzitná 1, 010 26, Žilina, Slovakia

Stanislaw Jemioło, Professor, Dr.Sc.,
Warsaw University of Technology; 1, Pl. Politechniki, 00-661, Warsaw, Poland

Konstantin I. Khenokh, Ing.
General Dynamics C4 Systems; 8201 E. McDowell Rd. MD H2606, Scottsdale, AZ 85257, USA

Christian Koch, Dr.-Ing.
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen, Gebäude IA, 44780, Bochum, Germany

Gaik A. Manuylov, Professor, PhD
Moscow State University of Railway Engineering; 9, Obratsova Street, Moscow, 127994, Russia

Alexander S. Noskov, Professor, Dr.Sc.
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mira Street, Ekaterinburg, 620002, Russia

Nelli N. Rogacheva, Professor, Dr.Sc.
National Research Moscow State University of Civil Engineering;
26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia

Grzegorz Świt, Professor, Dr.hab. Inż.,
Kielce University of Technology; 7, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego, Kielce, 25 – 314, Poland

Josef Vičan, Professor, PhD, Ing.
University of Žilina; Univerzitná 1, 010 26, Žilina, Slovakia

Artur Zbiciak, Associate Professor
Warsaw University of Technology; 1, Pl. Politechniki, 00-661, Warsaw, Poland

AIMS AND SCOPE

The aim of the Journal is to advance the research and practice in structural engineering through the application of computational methods. The Journal will publish original papers and educational articles of general value to the field that will bridge the gap between high-performance construction materials, large-scale engineering systems and advanced methods of analysis.

The scope of the Journal includes papers on computer methods in the areas of structural engineering, civil engineering materials and problems concerned with multiple physical processes interacting at multiple spatial and temporal scales. The Journal is intended to be of interest and use to researches and practitioners in academic, governmental and industrial communities.

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЖУРНАЛЕ

International Journal for Computational Civil and Structural Engineering

(Международный журнал по расчету гражданских и промышленных конструкций)

Международный научный журнал “International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций)” (IJCCSE) является ведущим научным периодическим изданием по направлению «Инженерные и технические науки», издаваемым, начиная с 1999 года. В журнале на высоком научно-техническом уровне рассматриваются проблемы численного и компьютерного моделирования в строительстве, актуальные вопросы разработки, исследования, развития, верификации, апробации и приложений численных, численно-аналитических методов, программно-алгоритмического обеспечения и выполнения автоматизированного проектирования, мониторинга и комплексного наукоемкого расчетно-теоретического и экспериментального обоснования напряженно-деформированного (и иного) состояния, прочности, устойчивости, надежности и безопасности ответственных объектов гражданского и промышленного строительства, энергетики, машиностроения, транспорта, биотехнологий и других высокотехнологичных отраслей.

В редакционный совет журнала входят известные российские и зарубежные деятели науки и техники. Основным критерий отбора статей для публикации в журнале – их высокий научный уровень, соответствие которому определяется в ходе высококвалифицированного рецензирования и объективной экспертизы, поступающих в редакцию материалов.

Журнал входит в Перечень ВАК РФ ведущих рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. В Российской Федерации журнал индексируется Российским индексом научного цитирования (РИНЦ). *Журнал входит в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI), полностью интегрированную с платформой Web of Science.* Журнал имеет международный статус и высылается в ведущие библиотеки и научные организации мира.

Издатели журнала – Издательство Ассоциации строительных высших учебных заведений /АСВ/ (Россия, г. Москва) и Издательский дом Begell House Inc. (США, г. Нью-Йорк). Партнерами издания является *Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН)* и *Научно-исследовательский центр СтаДиО (ЗАО НИЦ СтаДиО)*.

Цели журнала – продемонстрировать в публикациях российскому и международному профессиональному сообществу новейшие достижения науки в области вычислительных методов решения фундаментальных и прикладных технических задач, прежде всего в области строительства.

Задачи журнала:

– предоставление российским и зарубежным ученым и специалистам возможности опубликовать результаты своих исследований;

– привлечение внимания к наиболее актуальным, перспективным, прорывным и интересным направлениям развития и приложений численных и численно-аналитических методов решения фундаментальных и прикладных технических задач, совершенствования технологий математического, компьютерного моделирования, разработки и верификации реализующего программно-алгоритмического обеспечения;

– обеспечение обмена мнениями между исследователями из разных регионов и государств.

Тематика журнала. К рассмотрению и публикации в журнале принимаются аналитические материалы, научные статьи, обзоры, рецензии и отзывы на научные публикации по фундаментальным и прикладным вопросам технических наук, прежде всего в области строительства. В журнале также публикуются информационные материалы, освещающие научные мероприятия и передовые достижения Российской академии архитектуры и строительных наук, научно-образовательных и проектно-конструкторских организаций.

Тематика статей, принимаемых к публикации в журнале, соответствует его названию и охватывает направления научных исследований в области разработки, исследования и приложений численных и численно-аналитических методов, программного обеспечения, технологий компьютерного моделирования в решении прикладных задач в области строительства, а также соответствующие профильные специальности, представленные в диссертационных советах профильных образовательных организациях высшего образования.

Редакционная политика. Политика редакционной коллегии журнала базируется на современных юридических требованиях в отношении авторского права, законности, плагиата и клеветы, изложенных в законодательстве Российской Федерации, и этических принципах, поддерживаемых сообществом ведущих издателей научной периодики.

За публикацию статей плата с авторов не взимается. Публикация статей в журнале бесплатная. На платной основе в журнале могут быть опубликованы материалы рекламного характера, имеющие прямое отношение к тематике журнала.

Авторам. Прежде чем направить статью в редакцию журнала, авторам следует ознакомиться со всеми материалами, размещенными в разделах сайта журнала (интернет-сайт Российской академии архитектуры и строительных наук (<http://raasn.ru>); подраздел «Издания РААСН» или интернет-сайт Издательства АСВ (<http://iasv.ru>); подраздел «Журнал IJCCSE»): с основной информацией о журнале, его целях и задачах, редакционной политикой, порядком рецензирования направляемых в журнал статей и пр.

Подписка. Журнал зарегистрирован в Федеральном агентстве по средствам массовой информации и охраны культурного наследия Российской Федерации. Индекс в общероссийском каталоге РОСПЕЧАТЬ – 18076.

По вопросам подписки на международный научный журнал “International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций)” обращайтесь в Агентство «Роспечать» (Официальный сайт в сети Интернет: <http://www.rosp.ru/>) или в издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ) в соответствии со следующими контактными данными:

ООО «Издательство АСВ»

Юридический адрес: 129337, Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 26, офис 705;

Фактический адрес: 129337, Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1, 5 этаж, офис 12 (ТЦ Мебель России);

Телефоны: +7 (925) 084-74-24, +7 (926) 010-91-33

Интернет-сайт: www.iasv.ru. Адрес электронной почты: iasv@iasv.ru.

Контактная информация.

По всем вопросам работы редакции, рецензирования, согласования правки текстов и публикации статей следует обращаться к главному редактору журнала *Сидорову Владимиру Николаевичу* (e-mail: sidorov.vladimir@gmail.com, iasv@iasv.ru, sidorov@raasn.ru) или техническому редактору журнала *Кайтукову Таймуразу Батразовичу* (адреса электронной почты: kaytukov@raasn.ru; tkaytukov@gmail.com). Кроме того, по указанным вопросам, а также по вопросам размещения в журнале рекламных материалов можно обращаться к генеральному директору ООО «Издательство АСВ» *Никитиной Надежде Сергеевне* (адреса электронной почты: iasv@iasv.ru, nsnikitina@mail.ru, ijccse@iasv.ru).

International Journal for
Computational Civil and Structural Engineering

(Международный журнал по расчету гражданских и промышленных конструкций)

Volume 12, Issue 1

2016

TABLE OF CONTENTS

Научно-исследовательский центр СтаДиО. 25 лет на фронте численного моделирования	<u>8</u>
<i>А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов</i>	
Об одном примере расчета трехмерного бруса на основе совместного применения метода конечных элементов и дискретно-континуального метода конечных элементов	<u>46</u>
<i>П.А. Акимов, О.А. Негрозов</i>	
Численное моделирование напряженно-деформированного состояния кирпичного жилого здания при взрыве бытового газа внутри помещения	<u>73</u>
<i>М.С. Барабаш, П.Н. Кирьязов, М.А. Ромашкина</i>	
Обоснование критериев предельных состояний каменных конструкций сейсмостойких зданий на основе численных исследований	<u>86</u>
<i>О.В. Кабанцев</i>	
Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных балок с трещинами в BK SCAD Office v. 21	<u>103</u>
<i>И.С. Кукушкин, М.А. Орлова</i>	
К методике инженерного расчета свайно-плитного фундамента	<u>110</u>
<i>Р.А. Мангушев, Л.Н. Кондратьева</i>	
Численное моделирование физически нелинейной динамической реакции высотных зданий при сейсмических воздействиях уровня МРЗ	<u>117</u>
<i>В.И. Травуш, А.М. Белостоцкий, В.В. Вершинин, К.И. Островский, Н.О. Петряшев, С.О. Петряшев</i>	
Изучение процесса разрушения связей сцепления при вдавливании стержня жесткой арматуры в бетон	
Часть 1: Экспериментальные исследования	<u>140</u>
<i>В.И. Травуш, Г.Г. Кашеварова, А.С. Мартиросян, В.С. Кузьминых</i>	
The Account of Non-Uniformity of the Tension in Problems of the Statics and Dynamics of Ideally Plastic Shallow Shells	<u>147</u>
<i>Aleksandr V. Starov, Sergei Yu. Kalashnikov</i>	

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КИРПИЧНОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ БЫТОВОГО ГАЗА ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЯ

М.С. Барабаш, П.Н. Кирьязов, М.А. Ромашкина

Национальный авиационный университет, г. Киев, УКРАИНА

Аннотация. Предложена методика определения величины нагрузки от дефлаграционного взрыва. Описаны 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.

Ключевые слова: конечно-элементная модель, взрыв бытового газа, прогрессирующее обрушение, запроектные воздействия, дефлаграционный взрыв, компьютерное моделирование, нелинейный анализ

NUMERICAL MODELLING OF STRESS STRAIN STATE FOR THE BRICK RESIDENTIAL BUILDING IN CASE OF EXPLOSION OF DOMESTIC GAS INSIDE THE PREMISES

Maria S. Barabash, Petr N. Kiryazev, Marina A. Romashkyna

National Aviation University, Kiev, UKRAINE.

Abstract: The author suggests method for determining the load from deflagration wave. The author describes 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.

Keywords: finite element model, exploding of domestic gas, progressive collapse, load beyond design value, deflagration wave, computer modelling, nonlinear analysis

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании жилых зданий и производственных помещений часто не предусматриваются дополнительные меры по обеспечению прочности от динамического воздействия внутри помещения. Обычно при проектировании здания расчет на специальную динамическую нагрузку сводится к определению безопасного ударного давления, превышение которого приводит к разрушению сооружения. Следует отметить, что в последнее время в жилых зданиях, не относящихся к взрыво-

опасным, участились случаи обрушения несущих конструкций с последующим разрушением части или целого здания в результате взрыва природного газа внутри помещения. Кирпичная кладка подвержена значительным разрушениям по сравнению с бетонными или железобетонными несущими элементами, так как практически не сопротивляется действию горизонтальных нагрузок. При сравнительно небольшом прогибе при действии эксплуатационных вертикальных нагрузок, приложенных с эксцентриситетом, происходит потеря устойчивости верхних этажей и конструкций крыши. Крепления

стенных панелей, как правило, не рассчитаны на действие внутренних динамических нагрузок [1].

Нормативная документация многих стран [2-10] обязывает выполнять проектирование зданий и сооружений с учетом возникновения возможных запроектных воздействий, которые могут повлечь за собой прогрессирующее обрушение.

Анализ публикаций. Исследованию проблемы прогрессирующего обрушения посвящены работы Алмазова В. О., Барабаш М. С., Городецкого А. С., Мутюка Кяло, Расторгуева Б.С. Плотникова А. И., Хуснутдинов Д. З., Шапиро Г. И., Гурьева В. В., Эйсмана Ю. А., Powell G., Gilmour J.R. и Viridi K. S., Leyendecker E. V. и Ellingwood B. R., McGuire, W. и др. Следует заметить, что в нормативных документах разных стран неоднозначно трактуется «прогрессирующее обрушение». Отличаются не только определения, но и допустимые его размеры.

Разные подходы к моделированию процессов взрыва газа, к определению интенсивности нагрузки при взрыве в замкнутом помещении представлены в работах К. К. Андреева, А. Ф. Беляева, Ф. А. Вильямса, В. В. Воеводского, М. Г. Годжелло, Н. А. Гусева, Я. Б. Зельдовича, В. В. Казеннова, А. А. Ковальского, В.Н. Кондратьева, Г.Г. Орлова, Н.Н. Семенова, Д.А. Франк-Каменецкого, Ю.Б. Харитонов и др.

Из анализа этих работ можно сделать вывод, что в настоящее время нет единства во взглядах и методах расчета конструкций на взрывные воздействия. Различны не только оценки воздействия поражающих факторов на здания, но и расчетные показатели избыточного давления.

В решение проблем обеспечения взрывобезопасности и взрывоустойчивости зданий и сооружений, в том числе и при помощи использования предохранительных конструкций, внесли существенный вклад отечественные ученые: Андрианов Р.А., Бабкин В.С., Баратов А.Н., Белишев И.Р., Бобков С.А., Болодьян И.А., Водяник В.И., Васильев

А.А., Гвоздева Л.Г., Гельфанд Б.Е., Горев В.А., Григорян А.А., Гостинцев Ю.А., Дорофеев С.Б., Зельдович Я.Б., Казеннов В.В., Карпов В.П., Комаров А.А., Корольченко А.А., Макеев В.И., Махвиладзе А.Д., Мишуев А.В., Молчадский И.С., Мольков В.В., Некрасова В.П., Одишария Г.Э., Орлов Г.Г., Пилюгин Л.П., Попов В.А., Румянцев В.С., Сафонов В.С., Стрельчук Н.А., Франк-Каменецкий Д.А., Хуснутдинов Д.З., Шебеко Ю.Н., Шмелев Ю.Н., Щелкин К.И. и др.

Из зарубежных ученых, успешно занимающихся подобными проблемами, следует выделить Bradley D., Canu P., Crescitelli S., Fairweather M., Hirano T., Mitcheson A., Moen I.O., Pasman H.I., Rota R., Solberg D.M., Vasey M.W., Yao C., Zalosh R.G. и др.

Целью данной работы является разработка конечно-элементных моделей для оценки взрывоустойчивости и оценки степени поврежденности жилого кирпичного здания.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Решить все задачи, связанные с прогрессирующим обрушением строительных конструкций, экспериментальными методами не представляется возможным. Развитие компьютерных технологий и численных методов расчета позволяет решать многие задачи с помощью методов математического и компьютерного моделирования. В данной работе предложены конечно-элементные модели и подходы, которые можно использовать в дальнейшем для прогнозирования поведения конструкций при аналогичных запроектных воздействиях.

Рассмотрен случай взрыва бытового газа, произошедшего в одной из секций здания жилого кирпичного дома. Обрушение, которое произошло в результате взрыва (в соответствии с критериями многих норм) можно отнести к прогрессирующему обрушению.

Проведенные после взрыва здания обследования позволили сделать выводы об ошибках в проектных решениях, которые и привели к прогрессирующему обрушению.



Рисунок 1. Деформирована и разрушена кладка наружной несущей стены блок секции жилого дома с образованием трещин с четвертого по второй этаж.

Для проверки результатов обследования были составлены конечно-элементные модели и выполнены расчеты здания на взрывное воздействие, которые подтвердили правильность сделанных предположений, позволили смоделировать характер разрушения, и сделать предложения по реконструкции разрушенного здания.

До происшедшей аварии 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 этого не было предусмотрено надежное соединение плиты перекрытия и монолитного пояса.

Взрыв внутри здания (без дальнейшего горения) привел к обрушению строительных конструкций, изменению расчетной схемы и нарушению пространственной жесткости одной из секций жилого дома. Повреждены наружные и внутренние стены здания, обрушены междуэтажные перекрытия, а также

железобетонные плиты лоджии. В результате взрыва образовались выпуклости стен.

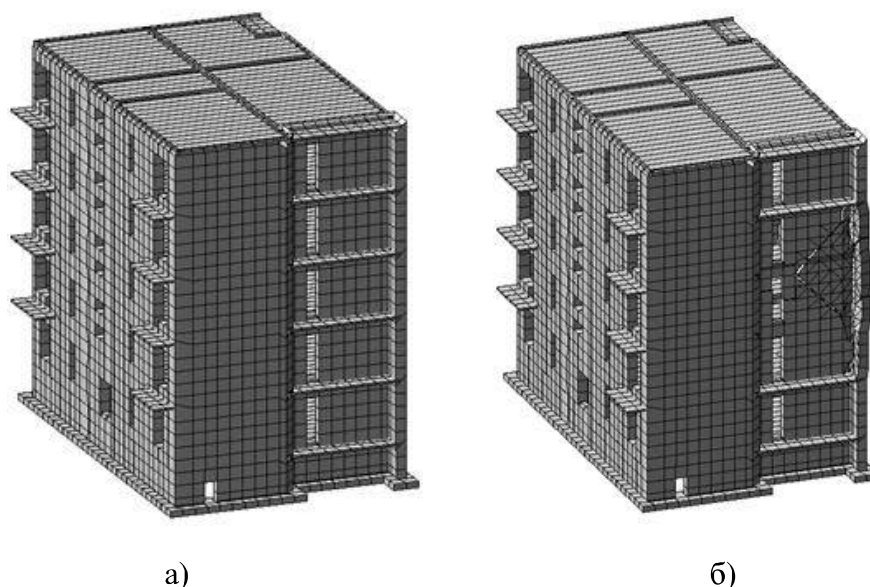
От динамического воздействия взрыва образовались трещины во внутренней стене здания с первого по пятый этаж, трещины в междуэтажных перекрытиях, что свидетельствует о деформировании и снижении пространственной жесткости здания (Рисунки 1, 2).

Для оценки НДС здания в стадии эксплуатации до взрыва и после взрыва было разработано несколько конечно-элементных моделей в программном комплексе (ПК) ЛИРА-САПР (рисунки 3а, 3б). Данные о прочностных и геометрических характеристиках элементов сооружения взяты из результатов обследований. Результаты расчета модели рисунок 3а) показали, что здание жилого дома запроектировано со значительным запасом прочности. Так, например, процент использования несущей способности наиболее нагруженного простенка — 33%. Наличие монолитных поясов значительно повысило пространственную жесткость здания.

Результаты расчета на модели, показанной на рис. 3, б), показали, что снижена несущая способность стен и плит перекрытия в месте обрушения строительных конструкций до 80%, а напряжения в кладке стен 2-го – 4-го этажей значительно превышают нормативные.



Рисунок 2. Обрушены перекрытия 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.



*а) б)
Рисунок 3. Конечно-элементная модель здания жилого дома:
а) до взрыва, б) после взрыва.*

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 гипотезы о том, что именно отсутствие надежного соединения плит перекрытия с монолитным поясом стало причиной характера разрушения (взрывной волной были отодвинуты стены, а плиты перекрытия, ли-

шенные опор, упали на нижние этажи), была составлена конечно-элементная модель, фрагмент которой показан на рисунке 4. По всей ширине обрушения плит перекрытия характер разрушения практически одинаков. Это позволило составить плоскую модель фрагмента кирпичной стены в месте взрыва. Кладка моделировалась пластинчатыми конечными элементами (КЭ) с учетом горизонтальных швов.

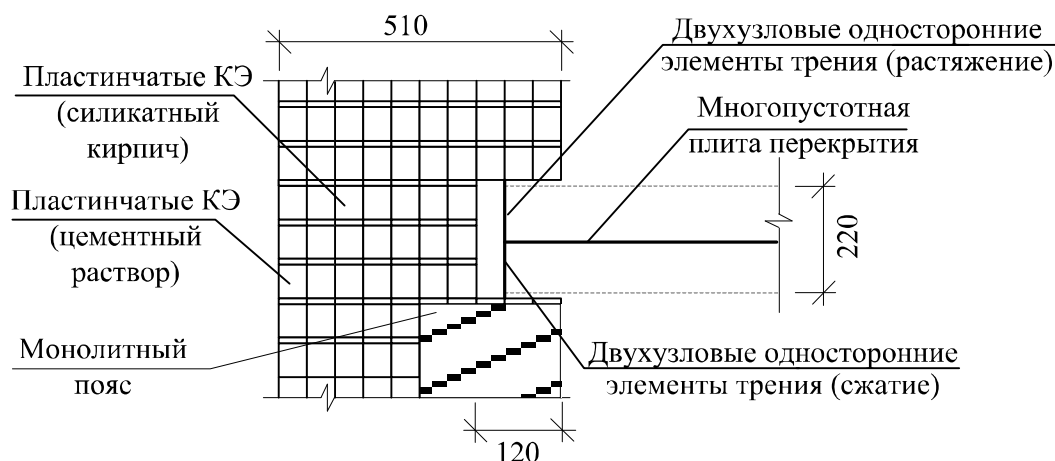


Рисунок 4. Фрагмент конечно-элементной модели кирпичной стены.

Плиты перекрытия моделировалась стержневыми КЭ. В узле опирания многопустотной плиты на кирпичную наружную стену моделировалась ниша (глубина опирания плиты 110 мм, зазор - 20 мм). 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 использованы специальные конечные элементы КЭ 264 – двухузловые односторонние элементы трения, которые введены 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. Чтобы обеспечить постоянную работу элементов при любых условиях нагружения на участках контакта плиты перекрытия и монолитного пояса были введены парные КЭ трения, одни из которых работали на сжатие, а другие на 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 ха-

рактер разрушения. Контактное трение зависит от нормальных сил взаимодействия, поэтому в данной задаче учитывался характер и история нагружения, а решение строилось на основе метода пошагового анализа. Такой подход позволяет задачу с односторонними связями и трением между взаимодействующими телами свести к рассмотрению самого нелинейного дискретного контактного слоя. В случае кратковременных нагрузок при сильных взрывах конструкции работают в упругопластической стадии, поэтому 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 [11]. В этой модели многопустотная плита перекрытия представлена стержнем эквивалентной жесткости.

О величине нагрузки на простенок во время взрыва. Импульсные нагрузки характеризуются непродолжительным главным импульсом, вследствие чего затухание проявляется в меньшей степени, чем при периодических нагрузках. При действии динами-

ческих импульсных сил сооружения, не имеющие достаточной прочности, теряют устойчивость. За короткий промежуток времени действия импульса силы затухания не успевают поглотить значительную долю энергии, выделяемой при взрыве [12-14]. Давление на фронте дефлаграционного взрыва Δp_{\max} рассчитывается по формуле (1) [15]:

$$\Delta p_{\max} = 2.1 p_0 \frac{\alpha^2}{1 + \alpha} \quad (1)$$

где $p_0 = 105$ Па, атмосферное давление; α - безразмерная скорость распространения пламени:

$$\alpha = \omega / a_0 \quad (2)$$

где $a_0 = 340$ м/с, скорость звука в воздухе; ω - скорость фронта пламени (м/с) определена по методике, изложенной в [15].

В соответствии с табл. 1 [16] природный газ по взрывоопасности относится к чувствительным веществам (класс 3). По классификации окружающей территории (пункт 2.2, [16]), помещение кухни отнесено к третьему виду - среднезагроможденное пространство. По экспертной табл. 2 [16] установлено, что реализуется 4-й режим взрывного превращения облака ($\omega = 150 \div 200$ м/с). Тогда согласно формулам (1) и (2) $\Delta p_{\max} = 47.9$ кПа. Радиус полусферы, образуемой газо-паро-воздушной смесью (ГПВС), определен по формуле (3) для следующих значений входящих в формулу величин: $C_{\text{ниж}} = 1.2$; $\mu = 166$ (табл. 9.7 [15]); $T = 390$ К (17°C); $T_0 = 373$ К.

$$R_0 = 0.7813 \sqrt[3]{\frac{2240 \kappa M_T T}{\mu C_{\text{ниж}} T_0}} = 0.7813 \sqrt[3]{\frac{2240 \cdot 0.05 \cdot 3.34 \cdot 293}{16 \cdot 5 \cdot 273}} = 3.63 (\text{м}) \quad (3)$$

где κ -доля массы горючего вещества, перешедшего в облако (газы при атмосферном давлении $\kappa = 1$) (таб.9.8 [15]); T - температура окружающей среды ($T = 20^\circ\text{C} + T_0 = 20^\circ\text{C} + 273 = 293\text{K}$), 20° - оптимальная температура воздуха кухни [17]; $T_0 = 273\text{K}$; $C_{\text{ниж}} = 5$, нижний объемный концентрационный процент воспламенения (таб.9.7 [22]); $\mu = 16$, молярная масса горючего (таб.9.7 [22]); M_T - масса горючего вещества, кг:

$$M_T = V_{\text{ком}} \frac{C_{\text{смх}}}{100} \gamma = 49.7 \frac{9.45}{100} 0.712 = 3.34 (\text{кг})$$

$V_{\text{ком}}$ - объем помещения, в котором произошел взрыв [18]; $C_{\text{смх}} = 9.45\%$, концентрация горючего в стехиометрической смеси $C_{\text{смх}}$, %; $\gamma = 0.712$ кг/м³, коэффициент перевода природного газа из кг в м³.

Радиус облака в конце взрыва найден по формуле (4) [15]:

$$R_n = R_0 \sqrt[3]{4 \left(1 + \frac{C_{\text{ниж}}}{C_{\text{смх}}} \right)} = 3.363 \sqrt[3]{4 \left(1 + \frac{5}{9.45} \right)} = 6.14 (\text{м}) \quad (4)$$

Для более детального количественного и качественного описания процесса дефлаграции, построена волновая диаграмма (рис.5,6) с использованием методики, предложенной в работе [15]:

Об особенностях расчета в системе ДИНАМИКА-плюс ПК ЛИРА-САПР. В системе ДИНАМИКА-плюс задается информация о профиле воздушной ударной волны, необходимая для расчета динамики во времени (рисунок 7).

Для решения проблемы динамического расчета конструкций используют два основных метода: прямое интегрирование уравнений движения и разложение по собственным формам.

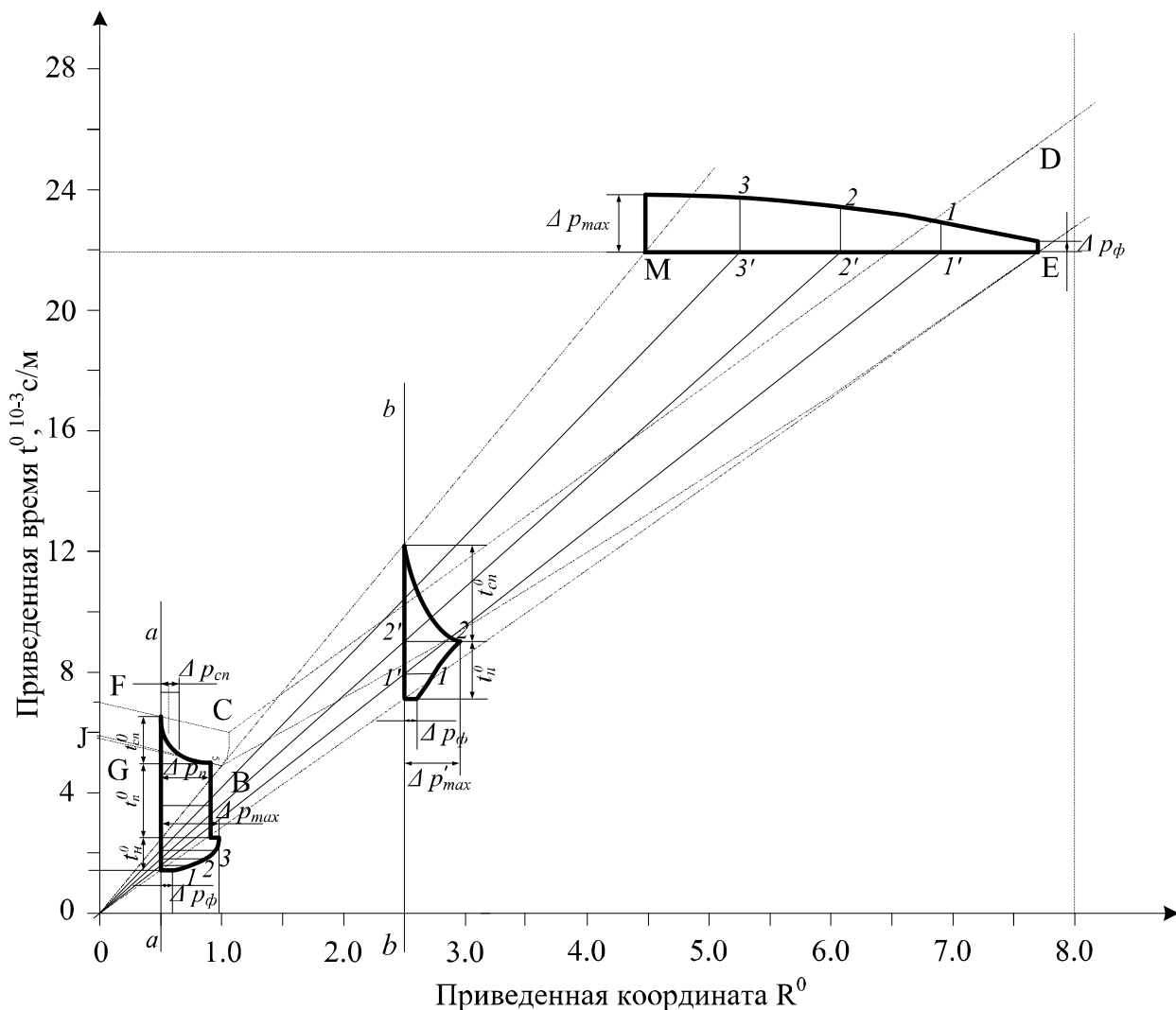


Рисунок 5. Профиль воздушной ударной волны при дефлаграционном взрыве бытового газа.

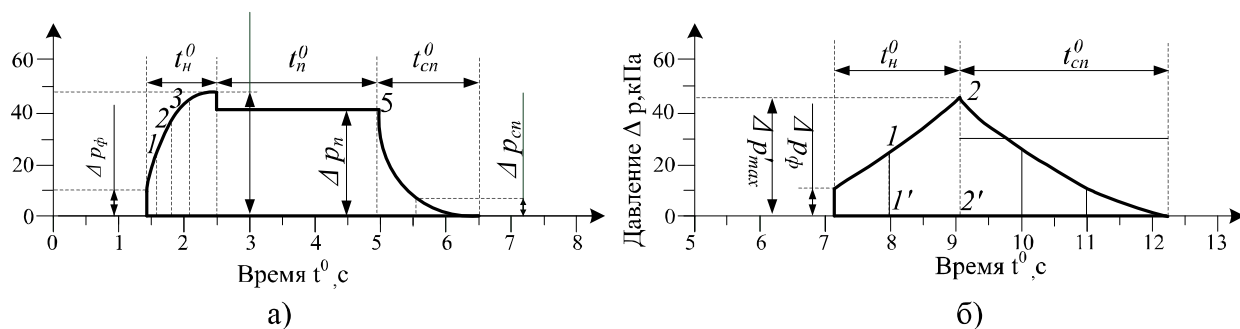


Рисунок 6. Профили воздушной ударной волны при дефлаграционном взрыве бытового газа: а) $R^0=0.5$, б) $R^0=2.5$

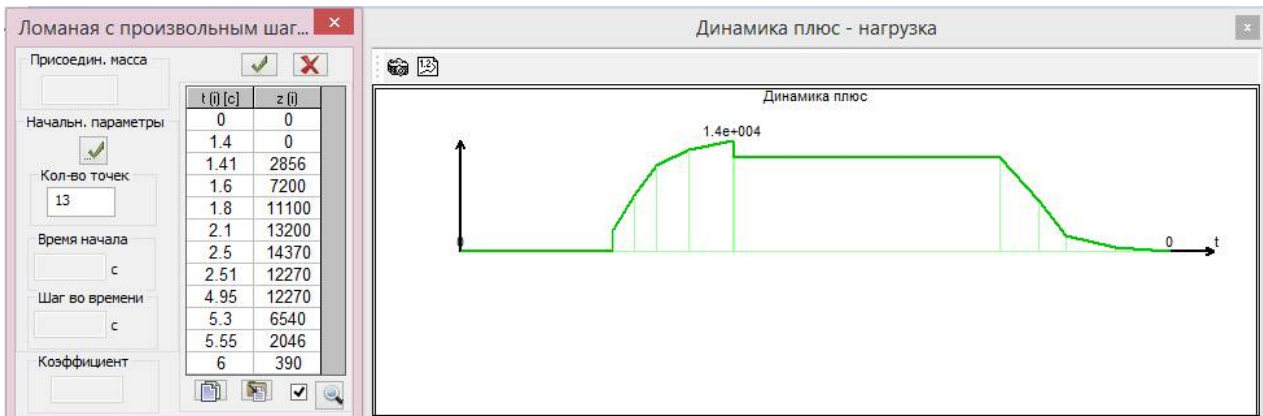


Рисунок 7. Задание динамических воздействий для расчета динамики во времени

Метод разложения по собственным формам можно применять только в рамках линейного расчета, так как принцип суперпозиций недействителен в рамках нелинейной теории. Методы же прямого интегрирования носят общий характер и могут применяться для решения всех задач динамического расчета конструкций.

В динамике во времени используется прямое интегрирование уравнений движения. Термин «прямое» обозначает, что перед интегрированием не выполняется никаких преобразований уравнений.

Расчет на динамические воздействия основан, как известно, на решении системы дифференциальных уравнений

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = \bar{q}(t) \quad (5)$$

где M , C , K – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости системы; $\bar{u}(t), \dot{\bar{u}}(t), \ddot{\bar{u}}(t)$ – векторы узловых перемещений, скоростей и ускорений в момент времени t ; $\bar{q}(t)$ – нагрузка, соответствующая моменту времени t .

Считается, что начальные скорости нулевые $\dot{\bar{u}}(0) = 0$, а начальные перемещения получены из решения первого нагружения $\bar{u}(0) = \bar{u}_1$. Из рассмотрения (5), как системы обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами следует, что аппроксимировать скорости, ускорения и перемещения можно любыми конечно-

разностными выражениями в перемещениях. Для ускорений в момент времени t , используя метод центральных разностей, можно записать

$$\ddot{u}(t) = \frac{\bar{u}(t + \Delta t) - 2\bar{u}(t) + \bar{u}(t - \Delta t)}{\Delta t^2} \quad (6)$$

Ошибка вычислений по формуле (6) имеет порядок Δt^2 и для вычисления скоростей и перемещений с ошибками того же порядка необходимо использовать выражения

$$\dot{\bar{u}}(t) = \frac{\bar{u}(t + \Delta t) - \bar{u}(t - \Delta t)}{2\Delta t} \quad (7)$$

$$\bar{u}(t) = \frac{\bar{u}(t + \Delta t) + \bar{u}(t - \Delta t)}{2} \quad (8)$$

Подставляя выражения (6), (7) и (8) в выражение (5) и определяя вектор $\bar{u}(t + \Delta t) + \bar{u}(t - \Delta t)$, получаем следующую систему уравнений

$$\left[\frac{2M}{\Delta t^2} + \frac{C}{\Delta t} + K \right] (\bar{u}(t + \Delta t) + \bar{u}(t - \Delta t)) = 2 \left(\bar{q}(t) + \frac{2M}{\Delta t^2} \bar{u}(t) + \frac{C}{\Delta t} \bar{u}(t - \Delta t) \right) \quad (9)$$

«Новые» перемещения $\bar{u}(t + \Delta t)$ определяются по ранее найденным перемещениям $\bar{u}(t)$ и $\bar{u}(t - \Delta t)$ путем решения системы уравнений (9).

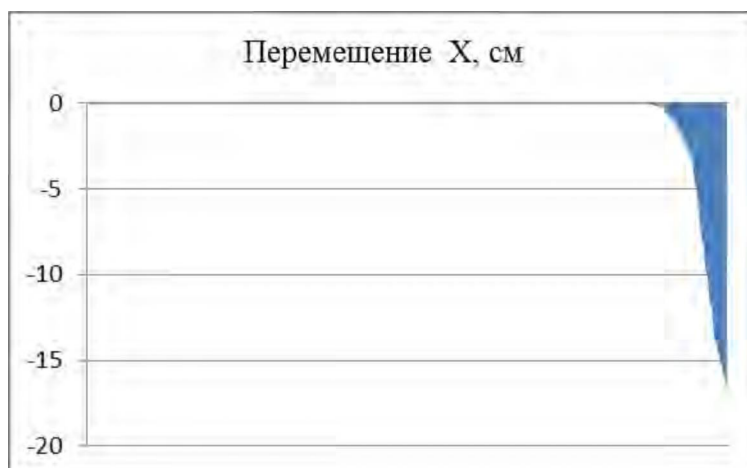


Рисунок 8. График максимального перемещения по оси X, мм фрагмента кирпичной стены (с учетом перемещений от первого статического нагружения).

Подобные схемы интегрирования называются схемами неявного интегрирования. Данная схема интегрирования получила название модифицированного метода центральных разностей. Выражение (9) является исходным при решении, как линейных, так и нелинейных задач прямым динамическим расчетом в ПК ЛИРА-САПР.

При решении задачи (5) используется согласованная матрица масс, построенная по тем же аппроксимирующим функциям, что и строилась матрица жесткости. При таком подходе учитывается и инерция вращения – появляются “крутильные” элементы матрицы масс.

При шаговом интегрировании уравнения колебаний реакция сооружения вычислялась для ряда последовательных интервалов времени Δt , которые выбирались из сходимости процесса. Неупругий характер работы учитывается определением в начале каждого интервала времени новых динамических характеристик, соответствующих изменяемому деформированному состоянию. Процесс вычисления является шаговым и продолжается от начала приложения нагрузки до любого момента времени с аппроксимацией неупругой работы конструкций. Полная реакция сооружения определялась интегрированием уравнений состояния.

Расчет на этой модели дал отклонение стены от вертикали 164мм, а в результате обследо-

вания установлено, что в результате взрыва стены здания сдвинулись с монолитных поэтажных поясов на величину до 150 мм, т. е. плиты перекрытия лишились опор (площадка опирания - 110 мм).

В месте взрыва возникло повреждение каменной кладки - трещины отрыва кирпичей по растворным швам (рисунок 9). Таким образом, в результате расчета была получена картина разрушения, ставшая причиной возникновения прогрессирующего обрушения. Это подтверждает и правильность предположения о причине такого характера разрушения.

Некоторые плиты после взрыва остались частично опертыми по длинной стороне.

Сменился характер их работы (сжатый в проектном положении слой плиты оказался растянутым). Это повлекло к частичному разрушению плит, характер разрушения плит виден на рисунке 10.

Для исследования НДС таких плит была составлена конечно-элементная модель, показанная на рисунке 11. Многопустотная плита перекрытия моделировалась оболочечными КЭ. Арматурные каркасы, верхняя и нижняя сетка в плите моделировались стержневыми КЭ.

Задача решалась в физически нелинейной постановке. Изменения характера работы плиты от нормального эксплуатационного к аварийному смоделированы с использованием постпроцессора МОНТАЖ ПК ЛИРА-САПР.

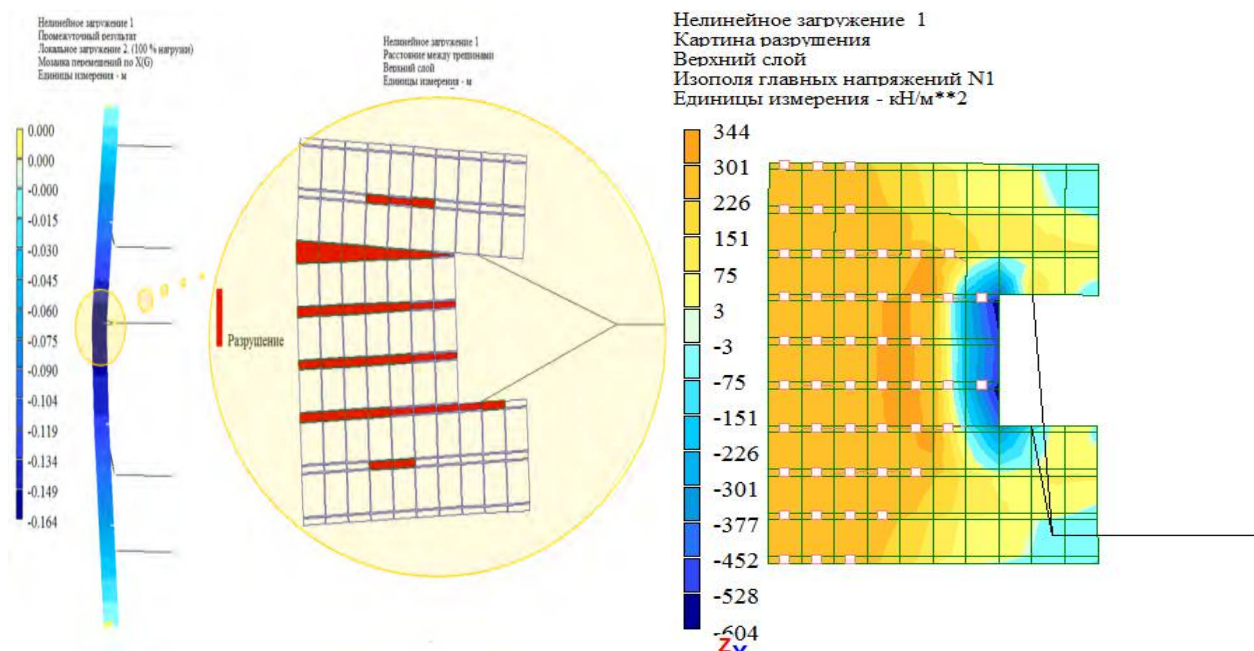


Рисунок 9. Некоторые результаты расчета конечноэлементной модели кирпичного простенка.



Рисунок 10. Обрушены перекрытия над вторым и третьим этажом.

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, похож

на реальную картину разрушения многослойной плиты.

ВЫВОДЫ

Сравнение картины трещин, полученных в результате численного моделирования, с фактическим расположением повреждений, позволяет говорить о достоверности математических моделей и предложенной технологии моделирования, которую в дальнейшем

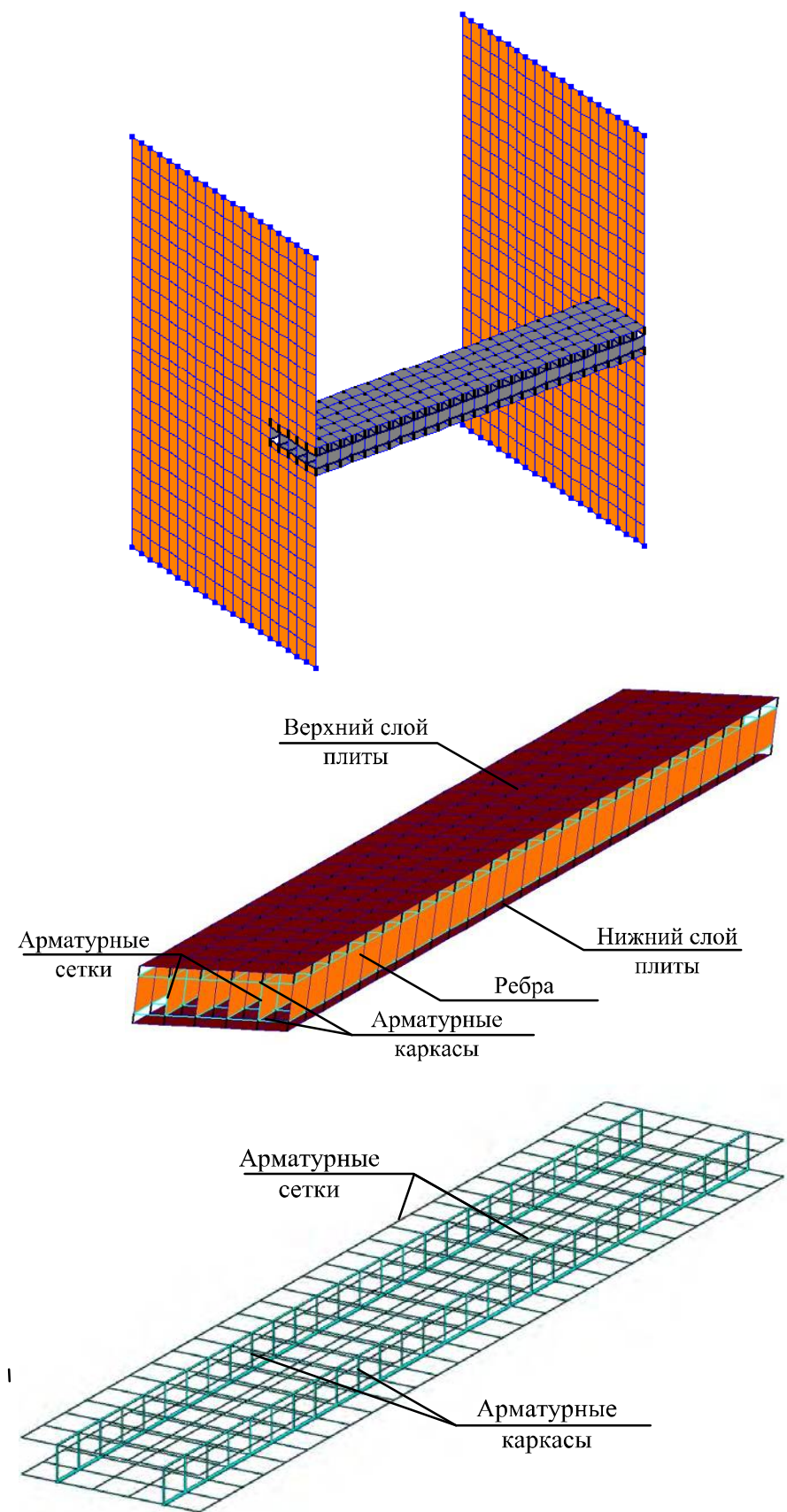


Рисунок 11. Конечно-элементная модель многослойной плиты перекрытия.

можно использовать для численных экспериментов с различными параметрами, влияющими на силу и место взрыва. Установлено, что не предусмотренное в проекте крепление плит перекрытия с монолитным поясом повлекло за собой прогрессирующее обрушение. Полное разрушение здания не произошло лишь благодаря поэтажным монолитным поясам. Монолитные пояса, из-за отсутствия надежных горизонтальных связей с плитами и стенами, восприняли появившуюся дополнительную нагрузку в вертикальной плоскости, и удержали зависшую разрушенную часть здания от дальнейшего обрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок. – [Введен в действие постановлением НТС АО «ЦНИИПромзданий»]. – Москва, 2000 г.
2. American Society of Civil Engineers (ASCE), (2005), — Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, SEI/ASCE 7-05, Reston, Va.
3. New York City Building Code, (1998), —Resistance to Progressive Collapse Under Extreme Local Loads
4. General Services Administration (GSA), (2003), —Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects
5. British Standards Institute, (2000), —Structural Use of Steelwork in Building, Part 1: Code of Practice for Design - Rolled and Welded Sections, BS 5950-1:2000
6. National Research Council of Canada, (1975, 1977, 1980, 1990, 1995), —National Building Code of Canada, Ottawa, Canada
7. 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).
8. 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).
9. Рекомендации по защите жилых зданий с несущими кирпичными стенами при чрезвычайных ситуациях. - М.: Москомархитектура, 2002. - 18с.
10. Рекомендации по предотвращению прогрессирующих обрушений крупнопанельных зданий. Ю.М. Стругацкий, Г.И. Шапиро, Ю.А. Эйсман. Москомархитектуры. М., 1999.
11. **Пангаев В.В., Сердюк В.М.** О деформативных характеристиках цементных кладочных растворов. // Известия вузов. Строительство, 2004, №9, с. 110-113.
12. **Newmark N.M., Rosenblueth E.** Fundamentals of Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New York, 1971, 344 p.
13. **Комаров А.А.** Прогнозирование динамических нагрузок при аварийных взрывах в помещениях. // Механизация строительства, №6, 2000, с. 21-26.
14. **Комаров А.А., Бузаев Е.В., Васюков Г.В., Загуменников Р.А.** Моделирование аварийных выбросов взрывоопасных веществ в помещении. // Вестник МГСУ, 2014, №10, с. 132-140.
15. **Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю.** Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 594 с.
16. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливозвоздушных смесей: РД 03-409-01. – [Введен в действие постановлением Госгортехнадзора России от 26-06-2001]. – М., 2001.
17. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.

ГОСТ 30494-96. - [Введен в действие с 01-03-1999]. – М., 1999.

18. **Рябінін І.М.** Фактори, які впливають на характер руйнувань при аварійних вибухах в приміщеннях. // Збірка наукових праць, 2013, №18, с. 210-216.

Барабаш Мария Сергеевна, академик Академии строительства Украины, директор ООО «ЛИРА САПР», доктор технических наук, доцент, профессор кафедры компьютерных технологий строительства Института аэропортов, Национального авиационного университета, 03058, Украина, г. Киев, проспект Космонавта Комарова, д. 1; тел: +38 (095) 286-39-90; e-mail: bmari@ukr.net, http: www.liraland.ru

Кирьязов Петр Николаевич, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных технологий строительства Института аэропортов, Национального авиационного университета, 03058, Украина, г. Киев, проспект Космонавта Комарова, д. 1; тел: +38 (050) 841-16-25; e-mail: petrkiryazev@gmail.com

Ромашкина Марина Андреевна, аспирантка кафедры компьютерные технологии строительства Института аэропортов, Национального авиационного университета, 03058, Украина, г. Киев, проспект Космонавта Комарова, д. 1; тел: +38 (095) 931-52-50; e-mail: mariromashkina@gmail.com.

Maria S. Barabash, Academician of the Academy of Construction of Ukraine, the director of "LIRA SAPR» Ltd, DSc (Eng.), Associate Professor, Professor of Department of Computer Technology Building, Institute of Airports, National Aviation University, 1, Kosmonavta Komarova, 03058, Kiev, UKRAINE.
phone: +38 (095) 286-39-90; e-mail: bmari@ukr.net.

Petr N. Kiryazev, PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Computer Technology Building, Institute of Airports, National Aviation University, 1, Kosmonavta Komarova, 03058, Kiev, UKRAINE.
phone: +38 (050) 841-16-25;
e-mail: petrkiryazev@gmail.com

Marina A. Romashkina, Postgraduate student; Department of Computer Technology Building, Institute of Airports, National Aviation University, 1, Kosmonavta Komarova, 03058, Kiev, UKRAINE.
phone: +38 (095) 931-52-50;
e-mail: mariromashkina@gmail.com