International Journal for
Computational Civil and Structural Engineering
(Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций)
Volume 12, Issue 3 ***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.
Dassault Systèmes Simulia;
1301 Atwood Ave Suite 101W
02919 Johnston, RI, United States

Mikhail Belyi, Professor
Dassault Systèmes Simulia;
1301 Atwood Ave Suite 101W
02919 Johnston, RI, United States

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

Nikolai P. Osmolovskii, Professor
Systems Research Institute
Polish Academy of Sciences;
Kazimierz Pulaski University
of Technology and Humanities in Radom;
29, ul. Malczewskiego, 26-600, Radom, Poland

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

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

Vladimir T. Erofeev, Professor
Ogarev Mordovia State University; 68 Bolshevistskaya Str., Saransk 430005, Republic of Mordovia, 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

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
Lublin University of Technology; Ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, Poland

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

Zbigniew Wojcicki, Professor
Wroclaw 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 Maldybayeva 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, M.Ing., M.Sc.
Trinity Industries, Inc.; 2525 Stemmons Freeway, Dallas, Texas 75207, 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, Obraztsova 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 строительных 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. Основной 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 – демонстрировать 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 публиковать 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 взымается. 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 целями и задачами, 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).

Журнал становится технологичнее. Издательство АСВ с сентября 2016 года является членом Международной ассоциации издателей научной литературы (PILA), осуществляющей свою деятельность на платформе CrossRef. Оригинальным статьям, публикуемым в журнале, будут присваиваться уникальные номера (индексы DOI – Digital Object Identifier), что значительно облегчит поиск метаданных и местонахождение полнотекстового произведения. DOI – это система определения научного контента в сети Интернет.

CrossRef – независимая организация, образованная в 2000 году по инициативе группы научных издателей. Инициатором разработки технологии стало издательство Wiley. Технология использования ссылок (DOI) принадлежит агентству CrossRef.

Publishers International Linking Association (PILA) – Международная ассоциация по связям издателей – является управляющей структурой агентства CrossRef – агрегатора и регистратора DOI, а также международной базой научных статей и их метаданных (www.crossref.org). На настоящий момент в базе несколько десятков миллионов материалов.

Использование этой технологии позволит представить информацию о журнале на международной платформе издателей научной литературы CrossRef, обеспечит удобный и принятый в мировом научном сообществе доступ к полнотекстовой электронной версии. Это значительно облегчит поиск научной информации, что способствует повышению наукометрических показателей авторов статей, публикуемых в журнале. Если, например, у произведения российского автора есть DOI и если на его работу имеется ссылка в публикации зарубежного коллеги в журнале, включенном в Web of Science и Scopus, то такое произведение автоматически попадает в эти базы данных и получает в нем собственный индекс цитируемости.

Все журналы, индексируемые в международной базе научного цитирования Web of Science и большинство периодических изданий, индексируемых в международной базе Scopus, имеют DOI. Использование цифрового идентификатора говорит прежде всего о технологическом качестве научного издания и является неотъемлемым атрибутом системы научной коммуникации за счет эффективного обеспечения процессов обмена научной информацией.

С октября 2016 года становится возможным прием статей на рассмотрение и рецензирование через он-лайн систему приема статей Open Journal Systems на сайте журнала. Автор будет иметь возможность следить за продвижением статьи в редакции в личном кабинете Open Journal Systems и получать соответствующие уведомления по электронной почте.

International Journal for
Computational Civil and Structural Engineering
(Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций)
Volume 12, Issue 3 ***2016***

TABLE OF CONTENTS (СОДЕРЖАНИЕ)

Математическое моделирование гидродинамики и устойчивости соосно вращающихся потоков 9
В.К. Ахметов, В.В. Ахметова

Моделирование запроектных воздействий при исследовании жизненного цикла конструкций зданий и сооружений 15
М.С. Барабаш

О вопросах автоматизации систем мониторинга для оценки текущего состояния строительных конструкций зданий и сооружений 26
А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов

Конструктивная нелинейность. Односторонние связи. Проблемы реализации 35
А.С. Городецкий, Д.А. Городецкий, А.В. Пикуль

Оценивание матричных параметров квадратичной модели нелинейного объекта управления 40
Р.Л. Лейбов

О явлении потери устойчивости продольно сжатой круговой цилиндрической оболочки. Часть 1: О послекритическом равновесии оболочки 58
Г.А. Мануйлов, С.Б. Косицын, М.М. Бегичев

Математическое моделирование сейсмических нестационарных упругих волн напряжением в Курпсайской плотине с основанием (полуплоскость) 73
В.К. Мусаев

О численном моделировании нестационарных сейсмических упругих волн напряжений в плотине Койна с основанием (полуплоскость) 84
В.К. Мусаев

О программно-алгоритмической реализации и апробации подхода к расчету строительных конструкций на основе совместного применения метода конечных элементов и дискретно-континуального метода конечных элементов 95
О.А. Негрозов, П.А. Акимов

Сопоставление конкурирующих результатов расчета 104
А.В. Перельмутер

Математическое моделирование долговечности тонкостенных пространственных конструкций в агрессивной среде 114
В.В. Петров

Об основных итогах Шестого Международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» 129
В.И. Травуш, П.А. Акимов, А.В. Баенхаев, А.Т. Беккер, А.М. Белостоцкий, Т.Б. Кайтуков, В.Н. Сидоров

Filtration of Forward and Back Flow of Suspension in Porous Media 145
Ludmila I. Kuzmina, Yuri V. Osipov

Информация о конкурсе на выполнение фундаментальных научных исследований Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации и Российской академии архитектуры и строительных наук в 2017 году 151

К Юбилею Владимира Ильича Травуша 155

К Юбилею Николая Ивановича Карпенко 156

К Юбилею Александра Тевьевича Беккера 157

К Юбилею Владимира Игоревича Андреева 158

К Юбилею Таймураза Батразовича Кайтукова 159

К Юбилею Александра Викторовича Кузьмина 160

К Юбилею Евгения Михайловича Чернышова 161

К Юбилею Бориса Александровича Крылова 162

Ушел из жизни Семен Макеевич Скоробогатов 163

DOI:10.22337/1524-5845-2016-12-3-9-14

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И УСТОЙЧИВОСТИ СООСНО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОТОКОВ

В.К. Ахметов, В.В. Ахметова
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: В рамках линейной теории численно исследована задача об устойчивости соосно вращающихся течений в осесимметричном канале по отношению к неосесимметричным возмущениям. Поле течений получено численно путем решения системы уравнений Навье-Стокса. Рассчитаны максимальные коэффициенты усиления и соответствующие критические параметры.

Ключевые слова: вязкая жидкость, гидродинамическая устойчивость, закрученный поток, численное моделирование, рециркуляционные зоны, коэффициенты усиления.

MATHEMATICAL MODELING OF HYDRODYNAMICS AND STABILITY OF COAXIAL ROTATING FLOWS

Vadim K. Akhmetov, Valentina V. Akhmetova
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

Abstract: The problem of the stability of coaxial swirling flows in an axisymmetric channel with respect to non-axisymmetric perturbations is investigated numerically within the framework of the linear theory. The flow field calculation results have been obtained as the solutions of the Navier-Stokes equations. The maximum amplification coefficients and the corresponding critical parameters are calculated.

Keywords: viscous liquid, hydrodynamic stability, swirling flow, numerical simulation, recirculating zone, amplification coefficients

1. ГИДРОДИНАМИКА ТЕЧЕНИЯ

Соосно вращающиеся потоки представляют большой интерес для изучения в связи с целым рядом свойств, позволяющих более интенсивно реализовывать процессы тепло и массообмена, положительно воздействовать на процессы горения, улучшать гидродинамические характеристики и устойчивость потока [1-5].

Рассмотрим течение вязкой несжимаемой жидкости в осесимметричном канале, на вход которого подаются два соосно закрученных потока: внутренний ($0 \le r \le r_0$) и внешний ($r_0 \le r \le r_1$). В качестве математической модели для исследования развития двух взаимодействующих потоков используем полную систему уравнений Навье-Стокса, которую в предположении осевой симметрии течения представим в виде:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial \psi}{\partial r}\right) = -\Omega \ , \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(V_z \Omega) + \frac{\partial}{\partial r}(V_r \Omega) =$$

$$= \frac{1}{\mathrm{Re}}\left[\frac{\partial^2 \Omega}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\Omega}{r}\right)\right] + G^2 \frac{1}{r}\frac{\partial (V_\varphi)^2}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V_\varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(V_z V_\varphi) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r V_r V_\varphi) + \frac{V_r V_\varphi}{r} =$$

$$= \frac{1}{\mathrm{Re}}\left[\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial V_\varphi}{\partial r}\right) - \frac{V_\varphi}{r^2}\right] \quad (3)$$

$$V_r = -\frac{1}{r}\frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad V_z = \frac{1}{r}\frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad \Omega = \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial r}. \quad (4)$$

Здесь ψ, Ω – функция тока и завихренность, V_z, V_r, V_φ – осевая, радиальная и азимутальная компоненты скорости в цилиндрической системе координат, $\mathrm{Re} = U_0 r_0 / \nu$, $G = W_0 / U_0$ – числа Рейнольдса и закрутки, U_0, W_0 – максимальные значения осевой и азимутальной скорости на входе в канал ($z = 0$), ν – кинематическая вязкость.

Развитие потока, показывающее изменение его характеристик вдоль оси канала, будем изучать в области D ($0 \le z \le z_k, 0 \le r \le r_k$, $r_k = r_1 / r_0$). Краевыми условиями для системы (1)–(4) служат начальное распределение скоростей V_z, V_φ (радиальная скорость принимается нулевой), условия прилипания на стенках и мягкие граничные условия в выходном сечении $z = z_k$:

$$\psi = f(r),\ V_\varphi = V_{\varphi 0}(r),\ \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0,\ 0 \le r \le r_k,\ z = 0,$$

$$\psi = \mathrm{const}, V_\varphi = 0, \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0, 0 < z \le z_k, r = r_k, \quad (5)$$

$$\psi = 0,\ V_\varphi = 0,\ \Omega = 0,\ 0 \le z \le z_k,\ r = 0,$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\partial \Omega}{\partial z} = \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} = 0, \quad 0 \le r \le r_k, \quad z = z_k.$$

Функция $f(r)$ получается интегрированием заданного распределения осевой скорости $V_{z0}(r)$ при $z = 0$ в соответствии с (4).

Начальное распределение скоростей задавалось в виде:

$$V_{z0}(r) = \begin{cases} 1, & 0 \le r \le r_{c1}, \\ 1 - k_1 (r - r_{c1})^2, & r_{c1} \le r \le 1, \\ V_z^* - k_2 (r - r_{c2})^2, & 1 \le r \le r_{c2}, \\ V_z^*, & 1 \le r \le r_{c2}, \\ V_z^* - k_3 (r - r_{c3})^2, & r_{c3} \le r \le r_k, \end{cases} \quad (6)$$

$$V_{\varphi 0}(r) = \begin{cases} s_1 r, & 0 \le r \le r_{a1}, \\ 1 - s_2 (r - r_{a1})^2, & r_{a1} \le r \le r_{a2}, \\ 1 - s_3 (r - r_{a2})^2, & r_{a2} \le r \le 1, \\ V_\varphi^* - s_4 (r - r_{a3})^2, & 1 \le r \le r_{a3}, \\ \dfrac{A r_k}{r}\left[1 - \exp\left(-B\left(\dfrac{r^2}{r_k^2}\right)\right)\right], & r_{a3} \le r \le r_{a4}, \\ b_0 + b_1 r + b_2 r^2, & r_{a4} \le r \le r_k. \end{cases} \quad (7)$$

Коэффициенты в выражениях (6), (7) составляли: $A = 0.554$, $B = 8$, $r_{c1} = 0.94$, $r_{c2} = 1.06$, $r_{c3} = 3.94$, $r_{a1} = 0.9$, $r_{a2} = 0.94$, $r_{a3} = 1.6$, $r_{a4} = 3.94$, $r_k = 4$.

Для численного решения краевой задачи (1)–(4) с граничными условиями (5)–(7) использовался конечно–разностный метод установления. Решение уравнения Пуассона (1) определялось по методу неполной редукции, а уравнения переноса (2)–(3) решались с помощью неявного метода блочной итерации. Аппроксимация диффузионных членов осуществлялась центральными разностями. При аппроксимации конвективных членов использовалась модифицированная схема Леонарда с квадратичными разностями против потока третьего порядка точности, в которой явным образом выделялась классическая противопоточная схема, а в источниковую часть уравнения добавлялись соответствующие корректирующие потоки. Для аппроксимации производных по времени использовалась схема Эйлера. При решении уравнения (2) относительно завихренности границы расчетной области, на которых формально не заданы условия для Ω, смещались на один шаг сетки внутрь расчетной области D, а значения на них рассчитывались исходя из разностной аппроксимации уравнения (1) с использованием односторонней четырехточечной аппроксимации для $\partial \psi / \partial n$.

Тестирование применяемого метода для различных технических приложений, связанных с задачами исследования закрученных течений, представлено в [6–11].

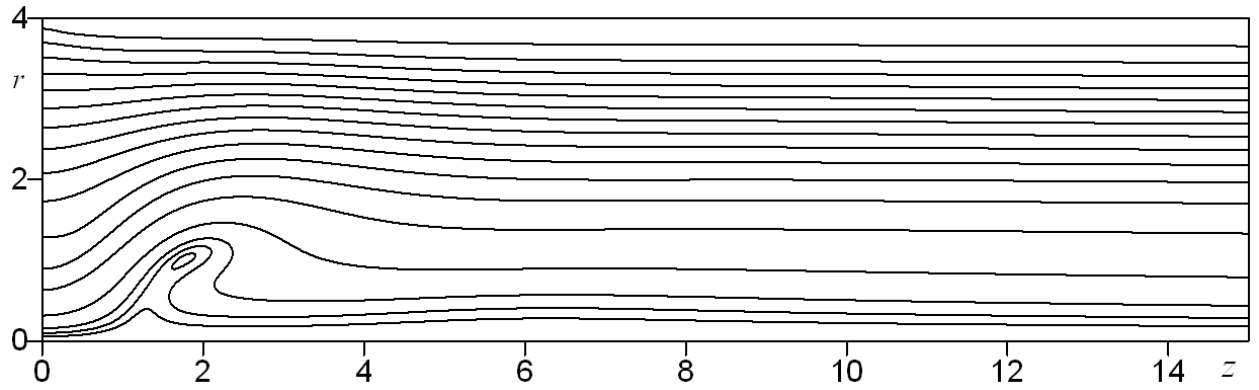


Рисунок 1. Линии тока при $\mathrm{Re}=100$, $G=1.8$, $V_z^*=0.3$, $V_\varphi^*=0.5$.

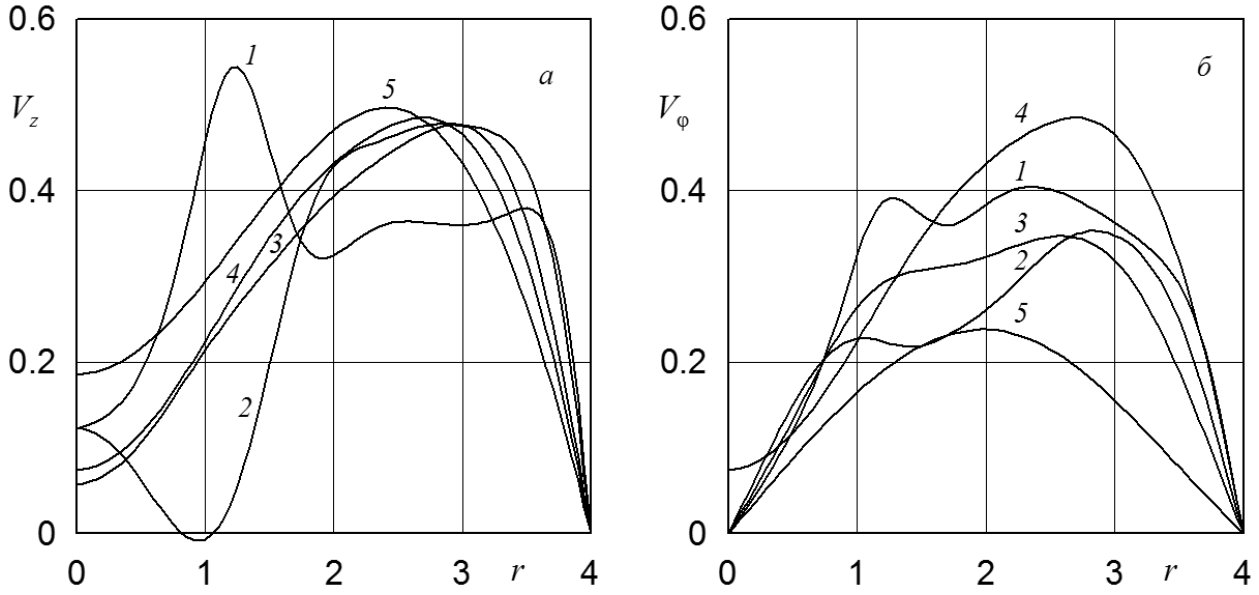


Рисунок 2. Профили осевой (а) и азимутальной (б) скоростей при $\mathrm{Re}=100$, $G=1.8$, $V_z^*=0.3$, $V_\varphi^*=0.5$ *в сечениях z=0.94, 2.5, 5, 10, 30 (кривые 1-5).*

Пример рассчитанной картины линий тока для случая начального вращения внешнего потока ($r_0 \le r \le r_1$) в одинаковом направлении по отношению к внутреннему представлен на рисунке 1. Здесь в начальной части потока образуется отрывная зона возвратного течения, характерная для явления распада вихря[12]. Причем в данном случае непосредственно вблизи оси потока осевая скорость течения положительна, а рециркуляционная область с отрицательными значениями V_z находится внутри основного потока. Профили осевой и азимутальной скоростей в локальных поперечных сечениях потока показаны для этого случая на рисунке 2.

2. УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ

Исследуем в линейной постановке задачу об устойчивости соосно вращающихся течений с полученными расчетными распределениями осевой $U(r)=V_z(r,z)$ и азимутальной $W(r)=V_\varphi(r,z)$ компонент скорости, где z – параметр (радиальная компонента скорости полагается равной нулю, так как ее величина

много меньше по сравнению с двумя другими компонентами).

Рассмотрим малые возмущения исходного течения как решения линеаризованных уравнений Навье–Стокса типа бегущей волны (нормальные моды):

$$\{V_z', V_r', V_\varphi', p'\} = \{F, iS, H, P\}\exp[i(\alpha z + n\varphi - \alpha ct)], \quad (8)$$

где p – давление; α – волновое число; n – мода возмущения $(n = 0;\pm1;\pm2;...)$, отрицательные значения соответствуют распространению волны в направлении противоположном закрутке; c – скорость распространения волны; i – мнимая единица. Для комплексных амплитудных функций $F(r)$, $S(r)$, $H(r)$, $P(r)$ получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned}
&r^2\gamma F + \alpha r^2 P + r^2 SU' = \\
&\quad = \frac{1}{i\,\mathrm{Re}}\left[r\left(rF'\right)' - \left(\alpha^2 r^2 + n^2\right)F\right], \\
&r^2\gamma S + 2rHW - r^2 P' = \\
&= \frac{1}{i\,\mathrm{Re}}\left[r\left(rG'\right)' - \left(\alpha^2 r^2 + n^2 + 1\right)S - 2nH\right], \\
&r^2\gamma H + r^2 S\left(W' + \frac{W}{r}\right) + rnP = \\
&= \frac{1}{i\,\mathrm{Re}}\left[r\left(rH'\right)' - \left(\alpha^2 r^2 + n^2 + 1\right)H - 2nS\right], \\
&\alpha rF + \left(rS\right)' + nH = 0,
\end{aligned} \quad (9)$$

где $\gamma = \alpha(U - c) + nW/r$, штрих означает производную по r. Граничные условия для системы (9) при $r = 0$ выводятся из требований регулярного поведения решения вблизи оси и имеют вид:

$$\begin{aligned}
&S(0) = H(0) = 0, \\
&F(0), P(0) - \text{ограничены при} n = 0; \\
&S(0) \pm H(0) = 0, \\
&F(0) = P(0) = 0 - \text{при } n = \pm1;
\end{aligned} \quad (10)$$

$$S(0) = H(0) = F(0) = P(0) = 0 - \text{при } |n| > 1;$$

$$S(r_k) = H(r_k) = F(r_k) = 0.$$

Будем рассматривать возмущения (8) периодические по z, амплитуда которых меняется со временем. Тогда α – действительное число ($\alpha = 2\pi/\lambda$, где λ – длина волны возмущения), а $c = c_r + ic_i$ – комплексное; c_r представляет собой скорость распространения возмущения в направлении z (фазовая скорость), c_i – скорость нарастания возмущения по времени, $\omega_i = \alpha c_i$ – коэффициент усиления возмущений, $\omega_r = \alpha c_r$ – частота колебаний. При $c_i < 0$ амплитуды возмущения (8) затухают (течение устойчиво), а при $c_i > 0$ – растут с течением времени (течение неустойчиво).

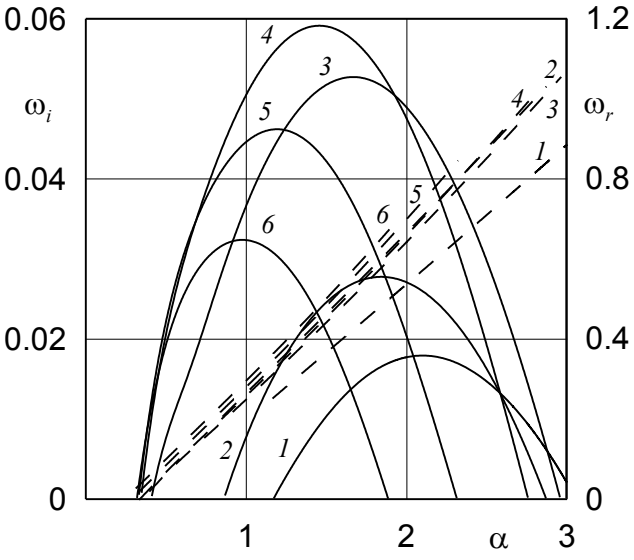


Рисунок 3. Зависимости коэффициентов усиления (сплошные линии) и частот колебаний (штриховые линии) при $\mathrm{Re} = 100$, $G = 1.8$, $V_z^* = 0.3$, $V_\varphi^* = 0.5$ *в сечениях z=0.94, 2.5, 5, 10, 20, 30 (кривые 1-6).*

Метод расчета собственных значений включает несколько этапов. Вблизи особой точки $r = 0$ строятся асимптотические решения по методу Фробениуса, которые позволяют пе-

ренести граничные условия в точку $r = r_a$. Далее от $r = r_a$ до $r = r_k$, решение продолжается внутрь расчетной области по методу Рунге-Кутта с автоматическим выбором шага и процедурой ортогонализации методом Грамма-Шмидта. Численные решения склеиваются в точке r_c $(r_a < r_c < r_k)$ путем решения методом Ньютона соответствующего характеристического уравнения.

Рассмотренный метод тестировался и успешно применялся при исследовании устойчивости модельных закрученных течений в [13], свободных вихрей [14–16] и расчетных течений в осесимметричном канале для одиночного вращающегося потока [17].

Рассчитанные распределения ω_r и ω_i для рассматриваемого примера показаны на рисунке 3. Вычисления проводились для моды при $n = -1$, так как согласно многочисленным исследованиям, например [18–20], она является наиболее опасной. Основное внимание уделялось наиболее быстро растущим возмущениям, хотя в [21] показана возможность существования в потоке до семи неустойчивых мод одновременно.

В приведенном на рисунке 3 примере видно, что данное течение становится неустойчивым уже в непосредственной близости от входного сечения при $z = 0.94$ (кривая 1). Далее вниз по потоку неустойчивость сначала усиливается и достигает максимальных значений при $z = 10$ (кривая 4), а потом ослабевает. Это свидетельствует о том, что распад вихревого течения обусловлен потерей устойчивости потока.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применяемая математическая модель для исследования гидродинамики соосно вращающихся потоков позволяет получить полную картину течения сложной структуры с формирующимися отрывными зонами, причем не только в приосевой, но и во внутренней области течения.
2. Проведенные исследования гидродинамической устойчивости показывают сильную неустойчивость в следе за областью возвратной зоны. Это способствует разрушению первоначально закрученного потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта № 15-01-05186-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гупта А., Лилли Д., Сайред Н.** Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987. – 588с.
2. **Ахметов В.К., Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Орехов Г.В.** Моделирование и расчет контрвихревых течений. – М.: АСВ, 2012. – 252 с.
3. **Волшаник В.В., Орехов Г.В.** Области применения взаимодействующих закрученных потоков жидкостей и газов // Вестник МГСУ, 2015, №7, с. 87-104.
4. **Зуйков А.Л.** Гидравлическое моделирование контрвихревых течений // Вестник МГСУ, 2014, №6, с. 114-125.
5. **Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л.** Введение в теорию концентрированных вихрей. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 504 с.
6. **Ахметов В.К., Шкадов В.Я.** Развитие и устойчивость закрученных течений // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа, 1988, №4, с. 3–11.
7. **Ахметов В.К.** Численное моделирование вихревых течений в задачах инженерной экологии // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2007, Volume 3, Issue 2, pp. 61-74.
8. **Ахметов В.К.** Структура и гидродинамическая устойчивость закрученных потоков с зонами рециркуляции. Диссертация на соискание ученой степени

доктора технических наук. Московский государственный строительный университет. Москва, 2009. – 307 с.
9. **Ахметов В.К.** Структура рециркуляционного течения и массоперенос твердых частиц в гидротехническом отстойнике // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2009, Volume 5, Issue 1&2, pp. 70-75.
10. **Ахметов В.К., Шкадов В.Я.** Взаимодействие струи с кольцевым закрученным потоком // Изв. РАН. Механика жидкости и газа, 1995, № 2, с. 39-46.
11. **Ахметов В.К., Шкадов В.Я.** Распыление порошка закрученным потоком с зоной рециркуляции // Изв. РАН. Механика жидкости и газа, 2000, №6, с. 3-15.
12. **Lucca-Negro O., O'Doherty T.** Vortex breakdown: a review. Progr. in Energy and Comb. Sci., 2001, V. 27, pp. 431-481.
13. **Ахметов В.К.** Устойчивость течений завихрегенерирующими устройствами // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2014, Volume 10, Issue 1, pp. 55-64.
14. **Ахметов В.К., Шкадов В.Я.** О новой вязкой моде неустойчивости свободного вихря // Изв. РАН, Механика жидкости и газа, 1999, №6, с. 76-80.
15. **Ахметов В.К., Шкадов В.Я.** К вопросу об устойчивости свободного вихря // Вестник МГУ. Сер. 1. Математика, механика, 1987, №2, с. 35-40.
16. **Ахметов В.К., Шкадов В.Я.** Неустойчивость свободного вихря при большой закрутке потока // Вестник Московского университета. Сер. 1: Математика. Механика, 2003, №1, с. 66-70.
17. **Ахметов В.К., Шкадов В.Я.** Устойчивость свободных и ограниченных закрученных течений с зонами рециркуляции // Инженерная физика, 2008, №6, с. 6-13.
18. **Garg A.K., Leibovich S.** Spectral characteristics of vortex breakdown flowfields // Phys. Fluids, 1979, V. 22, No. 11, pp. 2053-2064.
19. **Mayer E.W., Powell K.G.** Viscous and inviscid instabilities of a trailing vortex // J. Fluid Mech., 1992, V. 245, pp. 91-114.
20. **Lessen M., Paillet F.** The stability of a trailing line vortex. Part 2. Viscous theory // J. Fluid Mech., 1974, V. 65, Pt. 4, pp. 769-779.
21. **Ахметов В.К., Шкадов В.Я.** Ветвление собственных решений спектральной задачи об устойчивости свободного вихря // Вестник Московского университета. Сер. 1: Математика. Механика, 2005, №5, с. 54-59.

Ахметов Вадим Каюмович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»; 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; тел./факс: +7(499) 183-59-94;
e-mail: vadim.akhmetov@gmail.com

Ахметова Валентина Вадимовна, студентка Института строительства и архитектуры, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»; 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; тел./факс: +7(495) 781-80-07;
e-mail: akhmetova.valentina@gmail.com

Vadim K. Akhmetov, Doctor of Science, Professor, Department of Applied Mathematics; National Research Moscow State University of Civil Engineering; 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia; phone/fax: +7 (499) 183-59-94; e-mail: vadim.akhmetov@gmail.com

Valentina V. Akhmetova, Student, Institute of Construction and Architecture; National Research Moscow State University of Civil Engineering; 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia; phone/fax: +7 (495) 781-80-07; e-mail: akhmetova.valentina @gmail.com

DOI:10.22337/1524-5845-2016-12-3-15-25

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

М.С. Барабаш
ООО «ЛИРА САПР», г. Киев, УКРАИНА
Национальный авиационный университет, г. Киев, УКРАИНА

Аннотация: В статье рассматриваются возможные запроектные воздействия при проектировании, возведении и на эксплуатационной стадии. Представлено несколько способов проектирования реальных зданий с защитными мероприятиями от прогрессирующего обрушения. Моделирование запроектных воздействий необходимо для исследования живучести конструкций, 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 запроектные воздействия, а также исследования 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 математического 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 постадийности монтажа, выполнена проверка здания на опрокидывание. Также рассмотрено здание торгово-офисного комплекса 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.
Рассмотрен пример здания с возникшими запроектными нагрузками в процессе его возведения. В процессе авторского надзора было выявлено ряд колонн, не удовлетворяющих проектным характеристикам. Выполненное моделирование дало возможность сделать вывод о возникшем разрушении некоторых колонн в следствие перераспределения усилий и даны рекомендации по необходимости усиления.
Рассмотрен реальный пример исследования кирпичного эксплуатируемого здания при воздействии взрывной волны бытового газа.

Ключевые слова: запроектные воздействия, прогрессирующее обрушение, жизненный цикл, численное моделирование, компьютерное моделирование, нелинейный расчет, устойчивость, прочность, безопасность, надежность

MODELLING OF UNEXPECTED LOADS BEYOND DESIGN VALUE DURING RESEARCH OF BUILDING CONSTRUCTION LIFE CYCLE

Maria S. Barabash
"LIRA SAPR" Ltd., Kiev, UKRAINE
National Aviation University, Kiev, UKRAINE

Abstract: The paper focuses on possible unexpected loads beyond design value in design, erection and at the maintenance stage. The paper presents several methods for design of real buildings with safety measures against progressive collapse. Modelling of such unexpected loads is necessary for research of structures' survivability as well as possibility and mechanism how it will adapt to accidental failure of separate structural elements. In this regard, it is clearly necessary to

develop numerical methods for analysis of buildings in unexpected loads beyond design value and to study bearing structural elements in case of emergency.
The paper describes the technique that allows you to check stability of the building in progressive collapse. The procedure considers nonlinear analysis on specific (emergency) combination of normative loads. This combination consists of normative dead and live loads as well as loads from hypothetic local damages of bearing structures. The paper proposes mathematical justification for modelling of loading process based on updated step-type method as the basic method for modelling the life cycle for the structures.
The paper demonstrates real example of analysis on progressive collapse in high-rise residential building with underground parking with account of assemblage stages; a check for building in turn-over is carried out. Another example presents the building of commercial and office premises with public facilities and parking. In this example, analysis on progressive collapse for the floor slab of the upper technical storey was carried out. Slab was analysed in emergency landing or the crash of helicopter against the floor slab.
One more example presents the building where unexpected loads (beyond design value) arise during erection of the building. Several columns that do not meet design parameters were found during on-site supervision. The modelling enables the authour to draw a conclusion that several columns were damaged because forces were redistributed; recommendations on strengthening procedure are provided.
Real example of existing brick building in explosion of domestic gas is also presented.

Keywords: unexpected loads beyond design value, progressive collapse, life cycle, numerical modelling, computer modelling, nonlinear analysis, stability, strength, safety, reliability

ВВЕДЕНИЕ

Определяющее значение при проектировании имеет методика моделирования зданий с учетом реальной работы конструкций, нелинейных свойств материалов, учета процесса постадийного возведения, а также построение корректной конструктивной схемы здания с учетом изменения напряженно-деформированного состояния в течении жизненного цикла [2, 3]. Учет процессов жизненного цикла оказывает значительное влияние на формирование адекватной расчетной компьютерной модели здания и на выбор рационального метода расчета, позволяющего получить реальные данные о напряженно-деформированном состоянии (НДС) несущих конструкций [4, 9].

В статье предлагаются подходы, позволяющие перейти от ранее принятой концепции расчета (расчетная схема – НДС) к современной – моделирование процессов жизненного цикла (процесс возведения, процесс нагружения и др.). В частности, предлагается методика моделирования зданий на прогрессирующее обрушение с учетом приспособляемости конструкций.

Анализ публикаций. Вопросам разработки методов предотвращения прогрессирующему обрушению посвящены труды Алмазова В.О. [1], Плотникова А.И., Расторгуева Б.С. [12], работы сотрудников МНИИТЭП Шапиро Г.И., Гурьева В.В., Эйсмана Ю.А. [13], зарубежных ученых Powell G. [20], Gilmour J.R. и Virdi K.S. [17], Kaewkulchai G. и Williamson E.B. и [17], Pretlove A.J., Ramsden M. и Atkins A.G. [20], Leyendecker, E.V., Ellingwood, B.R. [19] и других ученых. В работах показано влияние динамического эффекта при прогрессирующем обрушении, которое уменьшается при увеличении пластических деформаций.

Следует отметить, что в нормативных документах разных стран неоднозначно трактуется «прогрессирующее обрушение». Отличается не только определение, но и допустимые его размеры [10, 11, 14, 15, 16].

Постановка задачи. Моделирование запроектных воздействий 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 боль-

шой 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 математическое моделирование процесса нагружения на основе уточненного шагового метода, как основного метода при моделировании процессов жизненного цикла конструкций.

В данной работе моделирование 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 [5]. 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 потребуется.

Далее на реальных примерах рассматривается методика оценки устойчивости каркасов высотных зданий при обрушении разных типов: обрушение опорной колонны нижнего этажа; расчет плиты на аварийную посадку либо крушение вертолета о колонну вертолетной площадки, взрыв бытового газа в кирпичном здании.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Решить задачи, связанные с запроектными воздействиями экспериментальными методами зачастую не представляется возможным. Развитие методов компьютерного моделирования и численных методов расчета позволяет решать подобные задачи. В статье предложены конечно-элементные модели и подходы, которые можно использовать в дальнейшем для прогнозирования поведения конструкций при аварийных ситуациях.

Например, 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 программных 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 натурных наблюдений).

Таким образом, в результате численного моделирования можно получить качественную оценку характеристик устойчивости кон-

струкции по отношению к прогрессирующему обрушению, а также сопоставить несколько возможных сценариев обрушения с целью выявления слабых мест конструкции.

Для оценки устойчивости здания к прогрессирующему обрушению 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 программном комплексе ЛИРА-САПР (ПК ЛИРА-САПР), выполнять расчет конструкций с учетом демонтажа разрушенных элементов при пониженных модулях упругости несущих элементов: вертикальных с коэффициентом - $0.6E_0$, плит перекрытия (покрытия) - $0.3E_0$. 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 принимаются равными единице. За расчетные характеристики материалов принимаются их нормативные значения. Кроме того, расчетные сопротивления умножаются 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.

ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

На стадии проектирования. Рассмотрим реальный пример выполнения расчета на прогрессирующее обрушение конструкций высотного жилого комплекса с подземным паркингом. Общая высота здания Н=+84,3м, $Н_{подвала}$=-4.3м, фундаментная плита 1.5м. Для получения достоверных данных о напряженно-деформированном состоянии (НДС) высотного здания расчет выполнен с учетом постадийности возведения и с учетом нелинейной работы материалов в программном комплексе ЛИРА-САПР (рис. 1). Для оценки устойчивости здания против прогрессирующего обрушения рассмотрены вариант разрушения одного из пилонов сечением 50х180см (площадь $0.9м^2$) в средней части здания с максимальным пролетом плиты 4.6 м. После удаления пилона изменяет конструктивную схема и характер работы пилонов примыкающих к месту разрушения. Пролет становится равным 8.85 м, плита «зависает» в месте удаления пилона (рис. 2).

Так максимальное перемещение по результатам линейного расчета составило 41,5 мм, а по нелинейному расчету - 154 мм (рис. 3). Перемещения по результатам нелинейного расчета больше в 3,7 раза, чем по результатам линейного расчета. Это свидетельствует о том, что при линейном расчете нельзя учесть реальную работу несущих элементов конструкции при возникновении аварийных ситуаций.

В качестве второго примера рассмотрим здание торгово-офисного комплекса с объектами общественного назначения и вертолетной площадкой. Фундаментная плита 1.35м, монолитный каркас +138.9м.

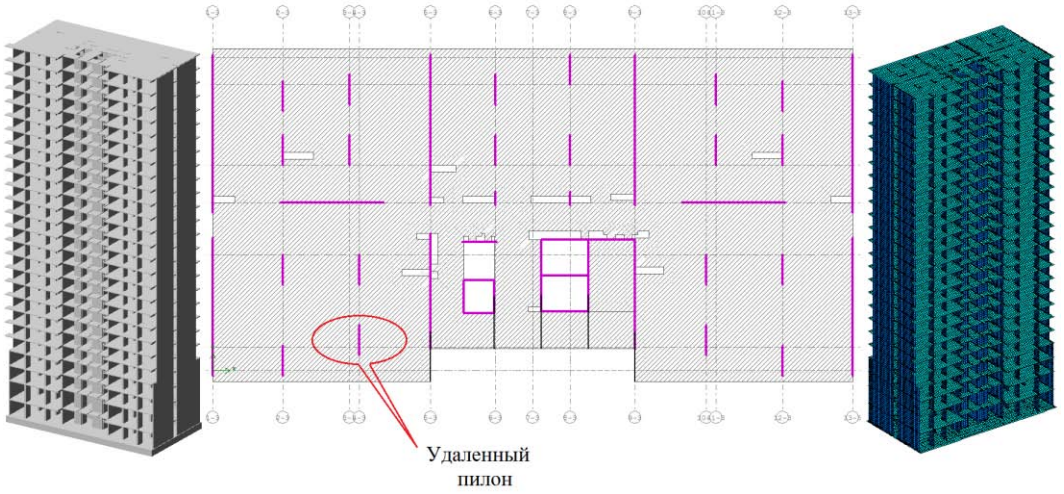


Рисунок 1. Пространственная схема здания, планы этажей и конечно-элементная схема.

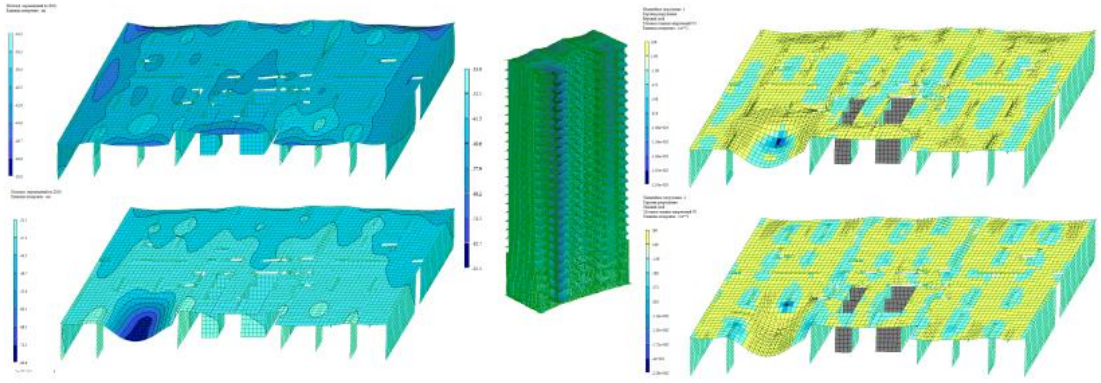


Рисунок 2. Напряженно-деформированное состояние плиты перекрытия при обрушении пилона, смоделированные в ПК ЛИРА-САПР.

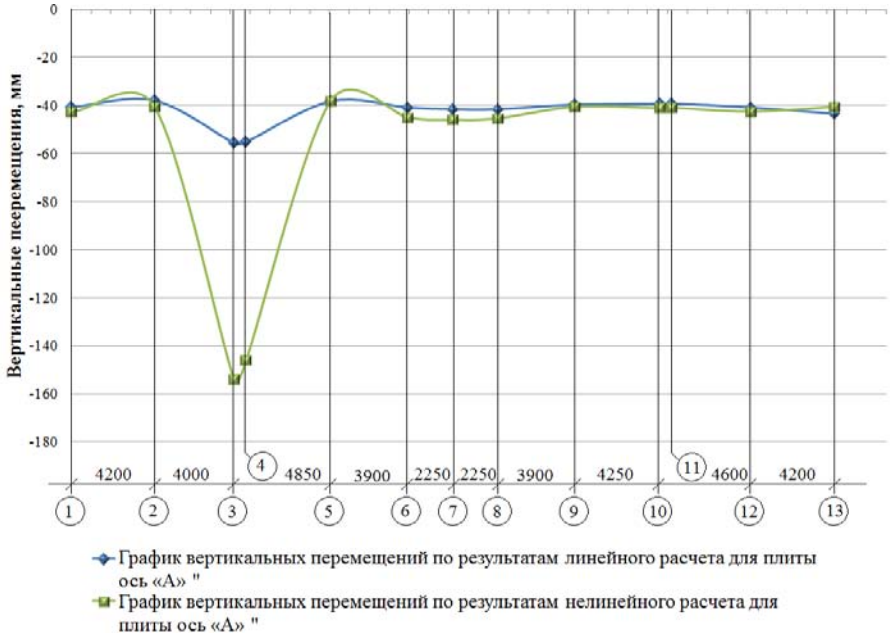


Рисунок 3. Графики вертикальных перемещений при обрушении пилона для плиты по оси «А».

Производится расчет шаговым методом на прогрессирующее обрушение плиты перекрытия верхнего технического этажа.

$$\{\sigma_i\}=\{\sigma_{i-1}\}+\{\Delta\sigma_i\},\ \{\Delta\sigma_i\}=[D]_i\cdot\{\Delta\varepsilon\}_i \qquad (1)$$

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

Критерием разрушения конструкций могут служить геометрическая изменяемость системы на m-том шаге; лавинообразный рост деформаций и перемещений системы. При этом в ПК ЛИРА-САПР выдается сообщение «разрушение конструкции» и дальнейший процесс расчета прекращается.

Выполним расчет плиты на аварийную посадку либо крушение вертолета о колонну вертолетной площадки. Далее проводится анализ трещинообразования на участке обрушения верхнего перекрытия (рис. 4). На рисунках видно, активное трещинообразование расположено в наиболее загруженном участке плиты.

Приведенный расчет плиты перекрытия в физически нелинейной постановке показывает, что в плите развиваются зоны трещин и образуются пластические шарниры. В нижней арматуре плиты в центре пролета зафиксирована текучесть арматуры. При этом в верхней зоне плиты над колоннами также развиваются верхние трещины, но разрывов арматуры в плите не зафиксировано. Это свидетельствует, что эксплуатационная пригодность плиты не обеспечивается, но дальнейшее прогрессирующее лавинообразное обрушение плит не происходит [7].

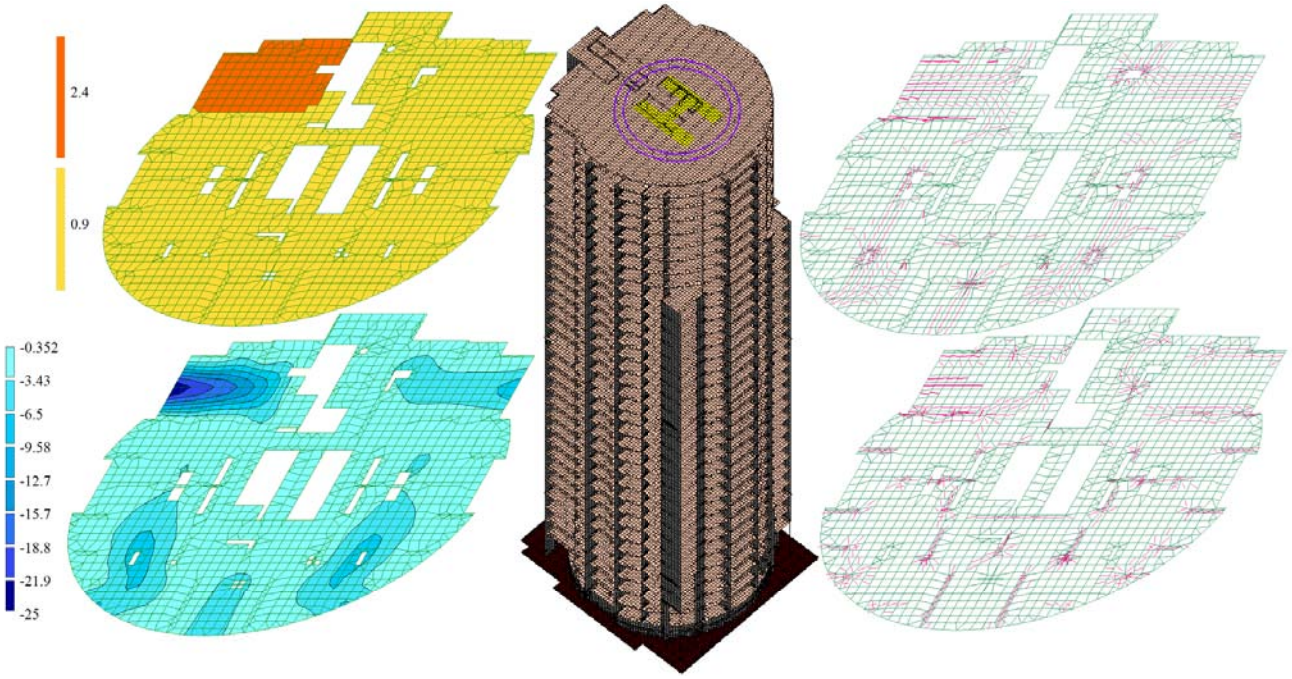


Рисунок 4. Расчетная модель и трещинообразование в плите перекрытия.

На стадии возведения. Приведем пример моделирования здания при запроектных воздействиях, возникших на стадии возведения.

На рис. 5 представлен общий вид расчетной схемы здания торгово-развлекательного центра с выделенными колоннами, которые подлежали обследованию и не удовлетворяющие проектным характеристикам. Расчетная схема достаточно подробная, включает 1.5 млн. неизвестных.

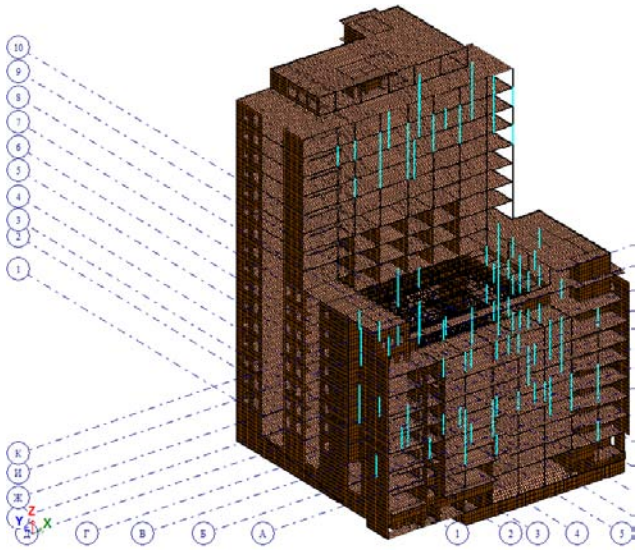


Рисунок 5. Расчетная схема здания, выделены колонны с неудовлетворительными проектными характеристиками.

Диафрагмы, фундаментная плита, плита перекрытия моделируются треугольными и четырехугольными элементами оболочки (42, 41, 44 типа). Балки, колонны, подкосы и фермы моделируются стержневыми конечными элементами.

В процессе возведения объекта велось научное сопровождение за процессом строительства. В ходе наблюдений была определена оценка прочности бетона в колоннах. Оценка прочности бетона выполнялась согласно ДСТУ Б.2.7-224:2009 «Правила контроля прочности». На рис. 6. а, б приведены снимки результатов наблюдений в процессе возведения здания.

Были выполнены проверочные расчеты с учетом полученных результатов оценки прочности бетона [5]. Расчеты выполнялись по следующей схеме.



а) *б)*

Рисунок 6. Результаты ультразвукового обследования колонн на стадии возведения.

На первом этапе выполнен расчет здания с проектными характеристиками материалов на проектные нагрузки. По результатам этого расчета сформированы нелинейные жесткости всех элементов расчетной схемы, за исключением специальных элементов моделирующих грунт (тип 56). Полученные нелинейные жесткости были откорректирова-

ны в соответствии с результатами обследования для колонн, с классом бетона ниже проектного (69 типов жесткостей). После этого выполнен второй этап расчета на все проектные нагрузки с учетом нелинейных свойств материала и реальных жесткостных характеристик, полученных по результатам обследований. На рис. 7, а приведены полученные результаты расчета в нелинейной постановке. На рис. 7,б обозначены разрушенные элементы.

Таким образом, полученные результаты численного эксперимента позволяют сделать вывод об эффективности нелинейного расчета по разработанной методике с учетом фактического состояния конструкций. При повреждении колонн наблюдается значительное перераспределение усилий на соседние конструктивные элементы, при этом на тех этажах, где повреждения значительные, то это может привести к разрушению, неповрежденных элементов, что показано на рис. 6.29,б. Красным цветом обозначена разрушенная колонна в виду перераспределения усилий, голубым цветом обозначены исследуемые поврежденные колонны.

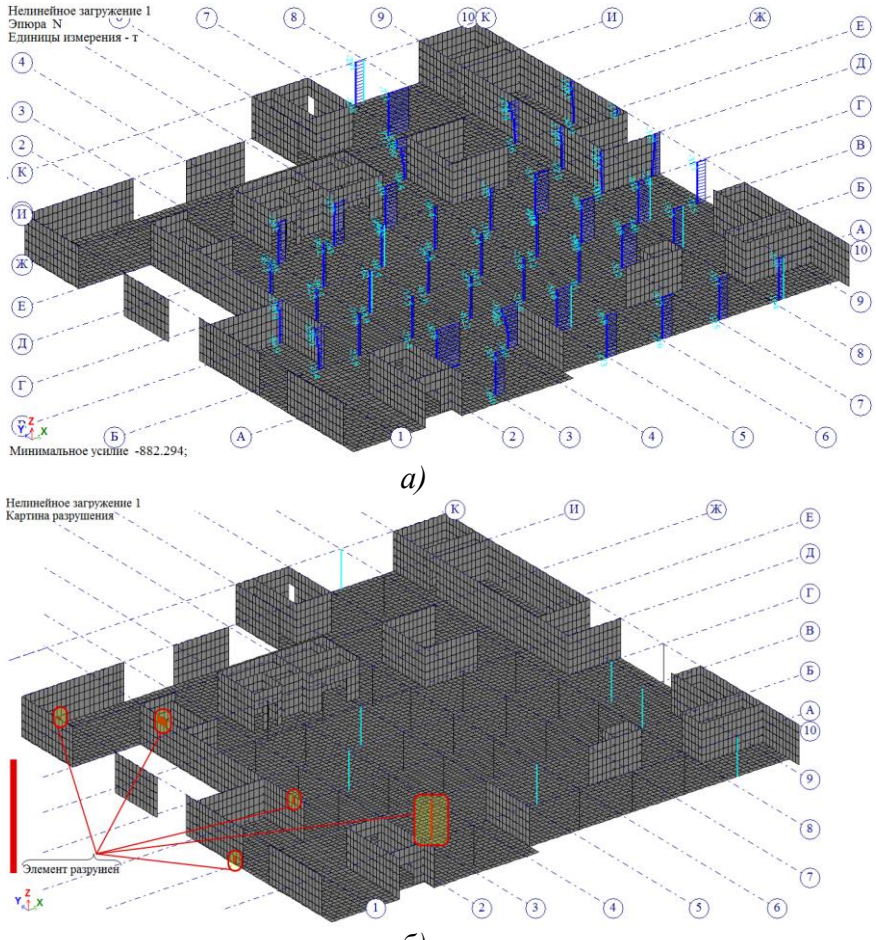


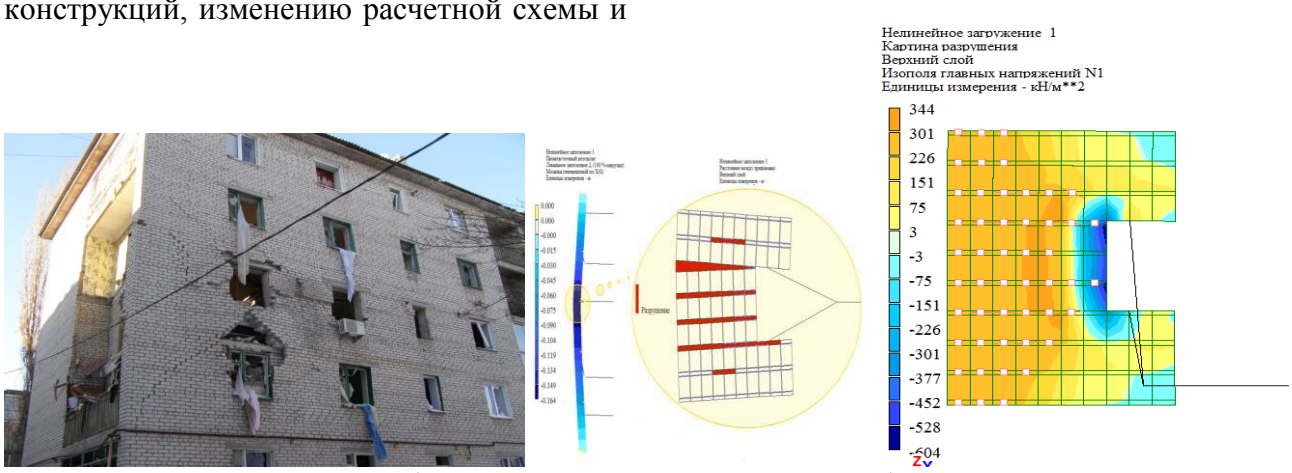
Рисунок 7. Реальное НДС колонн на проектной отметке +4.2 (а), картина разрушения (б).

На стадии эксплуатации. 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. Для проверки результатов обследования 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.

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 (Рис. 8).



а) *б)*

Рисунок 8. Деформирована и разрушена кладка наружной несущей стены (а), результаты расчета КЭ модели кирпичного простенка (б).

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, Задача решалась в физически нелинейной постановке. Изменения характера работы плиты от нормального эксплуатационного к аварийному смоделирован с использованием постпроцессора МОНТАЖ ПК ЛИРА-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, похож на реальную картину разрушения многопустотной плиты [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

При проектировании зданий и сооружений 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 запроектных воздействиях, которые могут возникнуть на различных стадиях жизненного цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алмазов В.О.** Проблемы прогрессирующего разрушения // Научно-технический журнал «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», 2009, №6, с. 3-10.
2. **Барабаш М.С., Городецкий А.С.** Исследование вопросов живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2010, №56, с. 123-128.
3. **Барабаш М.С.** Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография. – К.: Изд-во «Сталь», 2014. – 301 с.
4. **Барабаш М. С., Городецкий А. С.** Некоторые аспекты расчета зданий на устойчивость к прогрессирующему разрушению // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2009, №50, с. 157-162.
5. **Барабаш М.С., Ромашкина М.А.** Обеспечение конструктивной безопасности при проектировании высотных зданий с использованием ПК ЛИРА-САПР // Сборник научных трудов Международного научного семинара, г. Курск, 19-20 сентября 2013: Перспективы развития программных комплексов для расчета несущих систем зданий и сооружений. – Курск: ЮЗГУ, 2013, с. 73-82.
6. **Барабаш М.С., Ромашкина М.А.** Алгоритм моделирования и расчета конструкций с учетом ползучести бетона // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 10, Issue 2, 2014, pp. 56–64.
7. **Барабаш М.С., Ромашкина М.А.** Методика моделирования прогрессирующего обрушения на примере реальных высотных зданий // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. трудов. – Д.: ГВУЗ ПГАСА, 2014, №78, с. 28-37.
8. **Барабаш М.С., Кирьязев П.Н., Ромашкина М.А.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния кирпичного жилого здания при взрыве бытового газа внутри помещения // Международный научный журнал: International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 12, Issue 1, 2016, pp. 73-85.
9. **Городецкий А.С., Барабаш М.С.** Некоторые аспекты расчета зданий на устойчивость к прогрессирующему разрушению // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. научн. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА, 2009, №50, с. 157-162.

10. 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).
11. 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).
12. **Расторгуев Б.С., Плотников А.И., Хуснутдинов Д.З.** Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях. – М.: АСВ, 2007. – 152 с.
13. **Шапиро Г.И., Гурьев В.В., Эйсман Ю.А..** Методика расчета монолитных жилых зданий на устойчивость против прогрессирующего обрушения. – М.: МНИИТЭП, 2004. – 40 с.
14. American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures,‖ SEI/ASCE 7-05, Reston, Va, 2005.
15. British Standards Institute, Structural Use of Steelwork in Building, Part 1: Code of Practice for Design - Rolled and Welded Sections,‖ BS 5950-1:2000, 2000.
16. General Services Administration (GSA), Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects, 2003.
17. **Gilmour J.R., 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
18. **Kaewkulchai G., Williamson E.B.** Dynamic behavior of planar frames during progressive collapse. // 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, 2003.
19. **Leyendecker E.V., Ellingwood, B.R.** Design Methods for Reducing the Risk of Progressive Collapse in Buildings. // NBS Building Science Series 98, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1977.
20. **Powell, Graham.** Progressive Collapse: Case Studies Using Nonlinear Analysis. SEAOC Annual Convention, Monterey, August 2004.
21. **Pretlove A.J., Ramsden M., Atkins A.G.** Dynamic Effects in Progressive Failure of Structures. // International Journal of Impact Engineering, Vol. 11, No.4, 1991, pp. 539-546.

Барабаш Мария Сергеевна, академик Академии строительства Украины, директор ООО «ЛИРА САПР», доктор технических наук, 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

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., http: www.liraland.ru

DOI:10.22337/1524-5845-2016-12-3-26-34

О ВОПРОСАХ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

***А.М. Белостоцкий*[1,2,3,4], *П.А. Акимов*[1,2,3,5]**

[1] ЗАО «Научно-исследовательский центр «СтаДиО», г. Москва, РОССИЯ
[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, РОССИЯ
[3] Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, РОССИЯ
[4] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, РОССИЯ
[5] Российская академия архитектуры и строительных наук, г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: В статье, носящей обзорный характер, дается понятие о системе мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений, системе мониторинга инженерных (несущих) конструкций, приведены сведения о номенклатуре применяемых датчиков, компонентах систем мониторинга, проводных и беспроводных системах мониторинга, указаны технологии обнаружения повреждений.

Ключевые слова: мониторинг зданий и сооружений, проводные системы мониторинга, беспроводные системы мониторинга, датчики, технологии обнаружения повреждений

ABOUT AUTOMATION OF STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS

***Alexander M. Belostotsky*[1,2,3], *Pavel A. Akimov*[1,2,3,4]**

[1] National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA
[2] Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, RUSSIA
[3] Scientific Research Center “StaDyO”, Moscow, RUSSIA
[4] Perm National Research Polytechnic University, Perm, RUSSIA
[5] Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, RUSSIA

Abstract: The distinctive paper is devoted to the concept of structural health monitoring. Brief provides information about the nomenclature of sensors, wired and wireless structural health monitoring systems and technologies of damage detection is presented as well.

Keywords: structural health monitoring, wired structural health monitoring systems, wireless structural health monitoring systems, sensors, technologies of damage detection

1. ПОНЯТИЕ О СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ (СМИС) И СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ (НЕСУЩИХ) КОНСТРУКЦИЙ (СМИК)

Как известно, современные строительство и техническая эксплуатация зданий и сооружений с одной стороны характеризуются высокими темпами внедрения новых материалов, методов расчета, конструктивных решений, методов производства работ, а с другой стороны должны обеспечивать и решать вопросы безопасности жизнедеятельности человека. Очевидно, что появление новых задач, обусловленных инновационными процессами в технологии строительства, внедрение малоизученных материалов, строи-

тельство зданий в условиях плотной городской застройки в сжатые сроки, все более возрастающие по мере роста этажности зданий ветровые нагрузки, вес и скорость движения транспорта, вибрации от транспортных потоков, изменения в грунтах оказывают отрицательное воздействие на состояние конструкций и всего объекта в целом. Негативное воздействие указанных факторов можно в достаточной степени уменьшить, предупредив последствия их воздействия. В таких условиях важную роль играют методы экспериментального исследования строительных конструкций [18].

В настоящее время оценка технического состояния строительных конструкций выполняется все еще преимущественно методами визуального и неразрушающего контроля с использованием переносных технических средств [1-3]. Вместе с тем строительная отрасль характеризуются определенной спецификой. С одной стороны, неразрушающие методы контроля технического состояния конструкций уже несколько десятилетий успешно применяются, например, в машиностроении и, более того, носят в этой отрасли массовый характер, как при контроле качества выпускаемой продукции, так и при выявлении дефектов в функционирующих машинах и механизмах, с другой стороны контроль за техническим состоянием зданий и сооружений на стадии строительства выполняется выборочно, еще хуже ситуация с построенными объектами (после их ввода в эксплуатацию контроль технического состояния возлагается на эксплуатирующую организацию, которая ограничивается, как правило, только лишь визуальным осмотром конструкций). Таким образом, несмотря на надежность методов визуального и инструментального контроля, их основным недостатком является то, что они могут быть выполнены только лишь в период плановых обследований, ремонтов или замен эксплуатируемого оборудования. Более того, на практике обследование конструкций проводится преимущественно при возникновении повреждений или только после разрушении строительных конструкций, в результате чего в последние годы было отмечено немало случаев частичного или полного разрушения зданий.

Ограниченность методов неразрушающего контроля явилась, в свое время, мощным мотивационным стимулом для ученых и специалистов к созданию альтернативных методов оценки технического состояния машин, механизмов или строительных конструкций в процессе их эксплуатации. В результате проведенных исследований, были разработаны высокоэффективные методы оценки текущего (непрерывного) напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций, причем пионерными здесь стали отрасль авиастроения и военно-промышленный комплекс [4-12]. Таким образом, сейчас, наряду с неразрушающими методами контроля все чаще стала применяться непрерывная диагностика технического состояния конструкций, с использованием автоматизированных систем мониторинга. В Российской Федерации под автоматизированными системами мониторинга (рис. 1) понимаются *системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений* (*СМИС*) [23], подробно рассмотренные в [13].

За рубежом аналогичные системы называют «системы мониторинга здоровья конструкций» (*Structural Health Monitoring* (*SHM*)), а в атомной энергетике – системы непрерывного мониторинга (*On-Line Monitoring*). Непрерывный диагностический мониторинг [15-17], позволяющий в любой момент времени получить информацию о техническом состоянии элементов и конструкции в целом, – это, по существу, система наблюдений за состоянием объекта с накоплением информации и оценкой полученной информации с целью идентификации текущего состояния объекта, контроль изменения этого состояния во времени и взаимодействия объектов с природными и техногенными воздействиями на них, а также прогноза прочности и надежности его элементов, предупреждения

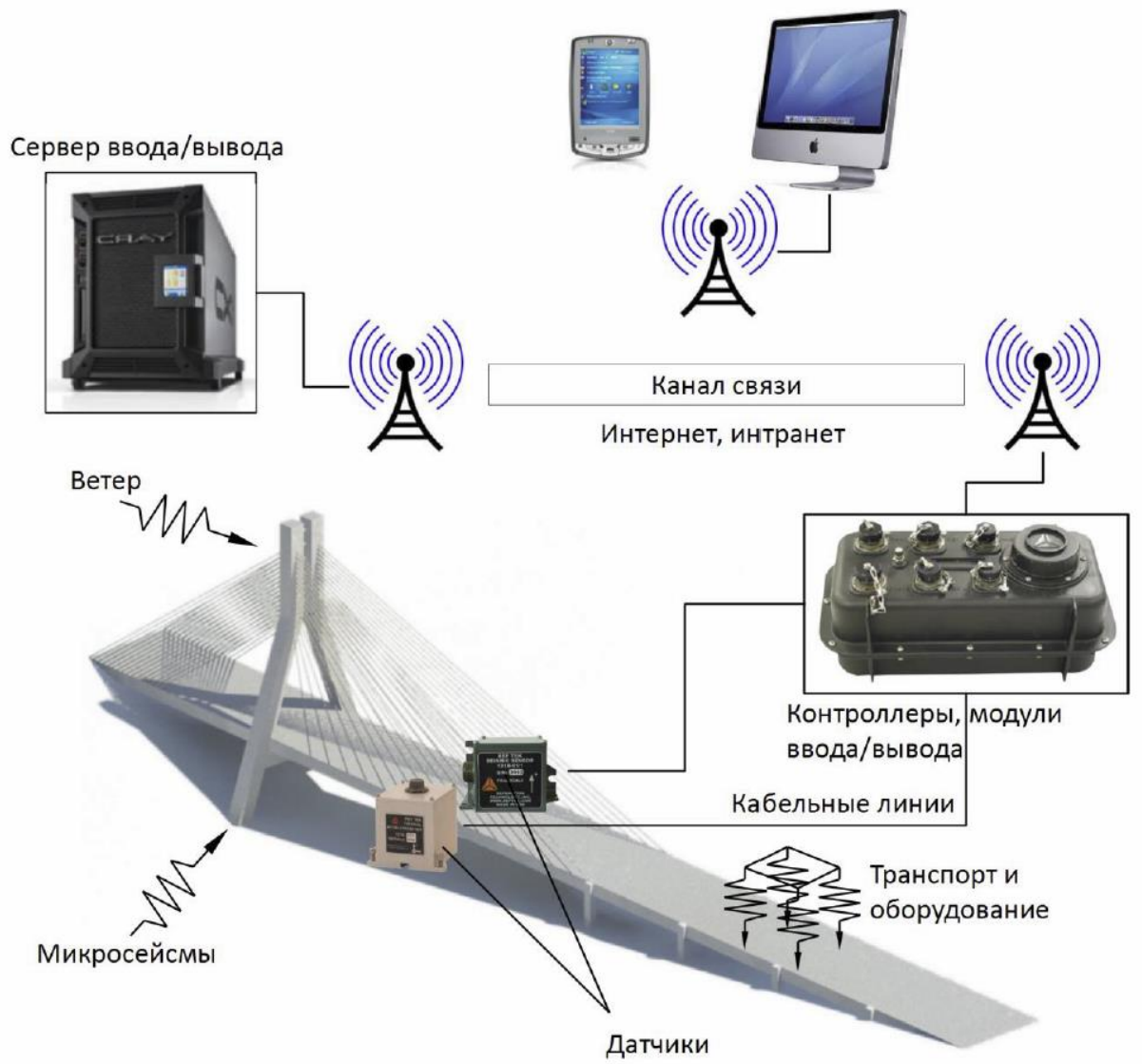


Рисунок 1. Структурированная схема автоматизированной системы мониторинга [*20*].

и устранения последствий негативных процессов. Вообще, можно отметить, что в последнее десятилетие в строительстве, по сути, возникло новое направление – моделирование жизненного цикла проектируемых сооружений с учетом всех эксплуатационных и природных воздействий. Именно такой подход стал использоваться и при оценке остаточного ресурса строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. Основой здесь является численное и компьютерное моделирование и реальный инструментальный мониторинг технического состояния конструкций зданий и сооружений.

СМИС, основное назначение которых заключается, очевидно, в заблаговременном выявлении зарождающихся дефектов и повреждений в материалах различных конструкций, обладают следующими несомненными преимуществами:

- в отличие от уже упомянутых неразрушающих методов контроля СМИС работают непрерывно и позволяют контролировать параметры технического состояния конструкций в режиме реального времени;
- СМИС обладают способностью непрерывно или с заданным интервалом времени, диагностировать места возникно-

вения дефектов в виде зарождающихся микротрещин, деструкции материала и оценивать остаточный ресурс конструкций;
- применение СМИС позволяет назначать плановый ремонт конструкций не по графику, а по их фактическому техническому состоянию, что увеличивает межремонтные сроки и сокращает затраты при эксплуатации конструкций;
- использование СМИС повышает безопасность производства, ввиду того, что осуществляется непрерывный анализ технического состояния конструкций и в случае превышения диагностируемых параметров выдаются соответствующие сообщения на рабочее место оператора.

В общем случае, *система мониторинга* включает набор датчиков различного назначения, распределенных по объекту, устройства сбора данных с датчиков (автономных блоков сбора данных, которые устанавливаются на объекте или контрольной станции), т.е. регистраторы (информация от датчиков постоянно сводится в контрольную станцию (центр приема)) и набор программного обеспечения, предназначенного для управления процессом сбора данных, их хранения в базе данных, обработки данных с использованием специальных процедур и алгоритмов, многовариантного вывода данных. Датчики соединяются с регистраторами посредством проводной или беспроводной системы передачи [14,19] (*имеют место соответственно проводная и беспроводная системы мониторинга*). Контрольная станция применяется для сбора информации, поступающей от блоков сбора информации, записи результатов на стационарный и съемный носители.

Применительно к зданиям сооружениям и комплексам мониторинг – это система визуальных и инструментальных наблюдений за техническим состоянием конструкций существующих зданий и сооружений (*система мониторинга инженерных (несущих) конструкций, опасных природных процессов и явлений* (*СМИК*) – подсистема СМИС), нацеленная на оперативное установление возможных негативных воздействий и на их устранение. В случае СМИК монтируемые на элементах конструкций датчики призваны определять влияние физического (влажность, температура, кислотность окружающей среды) и силового (статическая и динамические нагрузки) воздействия на их прочность и деформируемость. Исторически, пионерные СМИК, устанавливавшиеся преимущественно на уникальных и ответственных объектах (например, на протяженных мостах, дамбах и др.) и предназначались для наблюдения за конструкциями при землетрясении, что в дальнейшем способствовало более глубокому пониманию природы землетрясений, анализу влияния последних на конструкции и привело к разработке более надежных проектов сооружений, возводимых в зонах с высокой сейсмической активностью.

СМИС, как и СМИК рекомендуется [14] проектировать на базе программно-технических средств, осуществляющих мониторинг и включающие следующие компоненты:
- комплекс измерительных средств;
- комплекс средств автоматизации и исполнительных механизмов проводной или беспроводной сети передачи информации;
- соответствующие программы расчета НДС конструкций зданий и сооружений.

При создании СМИК решаются следующие основные задачи [14]:
- выбор объектов контроля (тип конструкций, число контролируемых однотипных конструкций);
- выбор наиболее ответственных конструктивных элементов зданий или сооружений, определение в них опасных сечений и назначение контрольных точек для установки приборов и измерений;
- разработка методов определения контролируемых параметров, выбор серийных или разработка индивидуальных

технических средств контроля, изготовление и установка их на объекте;
- проведение инструментальных и визуальных наблюдений, определение фактических перемещений, напряжений, усилий в контролируемых конструктивных элементах;
- оценка технического состояния конструкций по данным сопоставления анализа инструментальных измерений с результатами аналитических или численных расчетов с критериальными параметрами.

2. НОМЕНКЛАТУРА ПРИМЕНЯЕМЫХ ДАТЧИКОВ.

Номенклатура современных применяемых датчиков следующая [19]:
- климатические датчики – датчики силы и направления ветра, температуры и влажности;
- тензометрические датчики деформации (напряжения) – тензометры;
- акселерометры – датчики ускорений и вибрации;
- инклинометры – датчики наклона;
- датчики перемещения – механические, лазерные или GPS.

Заметим, что применяемая номенклатура и количество датчиков, входящих в СМИК, определяется проектом и может меняться.

3. КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

Основным компонентом систем мониторинга являются сенсорные узлы (поясним, что сенсорным узлом называется группа датчиков (обычно от 4 до 8), имеющих источник питания и подключенная к устройству сбора данных; группа сенсорных узлов образуют сенсорную сеть) с вышеперечисленными датчиками, которые размещаются в наиболее нагруженных элементах конструкций, определяемых по результатам расчетного обоснования (определения НДС) объекта, эффективно реализуемого с привлечением универсальных и специализированных конечноэлементных программных комплексов (ANSYS, SIMULIA Abaqus, NASTRAN и др. [24-26]). Сенсорные узлы выполняют различные задачи: собирают аналоговые сигналы с различных датчиков и превращают их в цифровой код; хранят данные с датчиков во внутренней памяти; анализируют данные в виде простых алгоритмов; посылают и получают данные с различных узлов, также как и передают их на центральное устройство (сервер) и могут работать определенное время без внешнего источника питания. Сенсорные узлы включают центральный процессор (CPU) или цифровой сигнальный процессор (DSP) с достаточной памятью, низкочастотный передатчик, аналого-цифровой преобразователь (ADC), источник питания, один или несколько различных типов датчиков. Система мониторинга должна обеспечивать передачу данных с контролируемых конструкций без визуального их осмотра. Данные измерений с датчиков могут передаваться к пользователю различным путем (например, по радиочастоте в 2.5 ГГц [21]). Сенсорные узлы способны самостоятельно передавать сигналы только на небольшие расстояния, в связи с чем на объекте устанавливается центральное устройство, которое собирает и хранит информацию в базе данных для анализа информации, поступающей с различных узлов. Соответствующие данные используются для оценки текущего состояния конструкций и в случае наступления критической ситуации выдается сообщение в виде сигнала тревоги. Центральное устройство (в том числе соответствующие аппаратное обеспечение (обеспеченное бесперебойным питанием) и программное обеспечение) должно также выполнять калибровку датчиков и обеспечивать перепрограммирование узлов датчиков, сохраняя в целом систему достаточно гибкой.

4. ПРОВОДНЫЕ И БЕСПРОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Проводные системы мониторинга, применяющиеся уже достаточно давно (начиная со второй половины прошлого столетия; см., например, [22]), предполагают использование стандартных датчиков и систем сбора и передачи информации. Архитектура такой системы включает удаленные датчики, связанные проводами с центральной системой сбора данных. Как правило, подобные системы, включающие сотни датчиков являются дорогостоящими. Высокая стоимость проводных систем мониторинга является прямым результатом высокой стоимости самих датчиков (так, например, один акселерометр может стоить от 10 до 500 Евро, а система сбора информации и соединительные кабели для каждого датчика от 1000 до 2000 Евро [21]), значительных затрат на монтажные работы и содержание системы. В частности, затраты на монтажные работы могут составлять до 25% полной стоимости системы, при этом 75% затрат времени приходится на монтаж кабельных линий, что особенно критично при установке систем мониторинга на открытых объектах (например, на мостах, башнях, дамбах и т.п.), где проявляется значительное отрицательное воздействие окружающей среды. Питание сенсорных узлов осуществляется от внутренней электрической сети здания с напряжением в 220 В, путем преобразования его в постоянный ток с напряжением до 12 В. Очевидно, что при таком подходе необходимо включить в стоимость проекта затраты на устройство силовой сети питания сенсорных узлов и затраты на устройство слаботочной сети, по которой будет передаваться информация с сенсорных узлов на центральный сервер.

Беспроводные системы мониторинга – это одно из альтернативных, более дешевых технологических решений (беспроводные датчики дешевле в несколько раз – их стоимость составляет от 100 до 400 Евро [21]), получивших развитие в последние годы, в том числе и в Российской Федерации. Основной проблемой при использовании таких систем является необходимость периодической подзарядки или замены соответствующих источников питания. В некоторых случаях (например, при мониторинге большепролетных спортивных сооружений, мачт, башен, опор ЛЭП, ядерных реакторов и др.) добраться до сенсорного узла и заменить источник питания достаточно сложно и трудоемко.

В целом, как показывает зарубежный опыт использования систем мониторинга, их стоимость составляет, как правило, от 1 до 3 процентов от стоимости объекта. Вместе с тем, в настоящее время развиваются новые технологии, снижающие затраты на установку и эксплуатацию таких систем.

5. ТЕХНОЛОГИИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Современные системы выполняют обнаружение повреждений конструкций по принципу «сенсорный узел – центральный процессор» – сенсорные узлы собирают информацию с датчиков и передают ее для последующей обработки на центральный сервер, где выполняются все необходимые вычисления (определение физических значений измеряемых величин по полученным сигналам с датчиков; анализ измеренных значений напряжений, деформаций, частоты колебаний в различных местах конструкций; сравнение их с проектными значениями (критериальными показателями); определение текущего показателя надежности в течение всего времени эксплуатации конструкции) [21].

Большинство вычислительных алгоритмов, разработанных для определения повреждений с использованием систем мониторинга, являются чрезмерно большими. Современные системы мониторинга характеризуются излишне высокой централизацией при сборе и анализе данных измерений. Алгоритмы

обнаружения повреждений, которые управляют процессом измерений, функционируют в системах мониторинга в центральном сервере. Ввиду того, что количество сенсорных узлов в системах мониторинга постоянно возрастает, использование централизованного сервера данных приводит к увеличению потока данных измерений и уменьшению быстродействия системы. В связи с этим, например, в работе [21] предлагается обрабатывать информацию непосредственно на сенсорных узлах (управление которыми осуществляется сервером), используя их внутреннюю память и соответствующие алгоритмы обработки данных измерений. В этом случае центральный сервер выполняет лишь роль координатора сенсорных узлов и оценивает работу всех конструкций зданий в едином целом по схеме «основание – фундамент – надземные конструкции». Заметим, что сенсорные узлы обладают способностью взаимодействовать друг с другом передавая соответствующую информацию. Представленный в [21] подход по оценкам авторов позволяет не только увеличить быстродействие всей системы мониторинга, но и существенным образом уменьшить потребление энергии с встроенного источника питания, так большая часть энергии затрачивается при передаче информации (например, через модем), вследствие чего срок работы сенсорного узла без замены источника питания увеличивается от 1-3 месяцев до 1 года.

Тип алгоритмов обнаружения повреждений (также как и тип датчиков) зависит от конкретной решаемой задачи и различен в зависимости от вида здания или сооружения, района его строительства.

ЗАМЕЧАНИЕ

Исследование выполнено за счет средств Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы в рамках Плана фундаментальных научных исследований Министерства строительства и жилищно-коммунального строительства Российской Федерации на 2016 год, тема 7.1.1 «Разработка многоуровневого подхода к исследованию напряженно-деформированного состояния конструкций в рамках единой иерархически выстроенной расчетной модели на основе совместного применения дискретно-континуального метода конечных элементов и метода конечных элементов» и тема 7.1.2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД ЭО 1.1.2.99.0624-11 Мониторинг строительных конструкций атомных станций. – М.: ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2011.
2. РД ЭО 1.1.2.99.0867-2012 Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса строительных конструкций атомных станций – М.: ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2013.
3. РБ-045-08. Динамический мониторинг строительных конструкций объектов использования атомной энергии. – М., 2008.
4. **Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B.** A Summary Review of VibrationBased Damage Identification Methods. // The Shock and Vibration Digest, 30(2), 1998, pp. 91-105.
5. **Farrar C.R.** Historical Overview of Structural Health Monitoring. Lecture Notes on Structural Health Monitoring using Statistical Pattern Recognition. Los Alamos Dynamics, Los Alamos, NN, 2001.
6. **Lynch J.P., Kenneth J.L.** A Summary Review of Wireless Sensors and Networks for Structural Health Monitoring. // The Shock and Vibration Digest, 2006.
7. **Hines J.W., Seibert R.** Technical Review of On-Line Monitoring Techniques for Performance Assessment. State-of-the-Art. University of Tennessee. Department of Nuclear Engineering. Vol. 1, 2006.

8. **Wilkie W.K., Bryant R.G., High J.W. et al.** Low-Cost Piezocomposite Actuator for Structural Control Applications. // Proceedings of the SPIE 7-th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. Newport Beach, CA, 2000.
9. **Heung-Seop Eom., Sa Hoe Lim., Jae Hee Kim., Young H. Kim., Hak-Joon Kim., Sung-Jin Song.** Development of On-Line Health Monitoring System for Pipes in Nuclear Power Plants. 2006.
10. **Thien A.B.** Pipeline Structural Health Monitoring Using Macro-fiber Composite Active Sensors. Thesis Master of Science. University of Cincinnati, 2003.
11. **Jin-Kyung Lee., Sang-Pill Lee., Joon-Hyun Lee.** Study on Damage Mechanism of Pipe Using Ultrasonic Wave and Acoustic Emission Technique. 2007.
12. **Won-Geun Yi., Min-Rae Lee., Joon-Hyun Lee.** A Study on Ultrasonic Testing for Nondestructive Evaluation of Thermal Fatigue Crack in Pipelines, 2006.
13. **Белостоцкий А.М., Акимов П.А.** К вопросу о проектировании систем мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. // Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. Сборник трудов №19. – М.: АСВ, 2016, с. 120-145.
14. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, 2010. – 56 с.
15. **Boldyrev G.D., Valeev D., Idrisov I., Krasnov G.** A System for Static Monitoring of Sports Center Structures. // Proceedings of the 7th Internat. Workshop on Structural Health Monitoring. Ed. Fu-Kuo, Stanford University, USA, 2009, Vol.1, pp. 374-382.
16. **Boldyrev G.G., Zhivaev A.A.** System for Static and Dynamic Monitoring and Ice Sport Arena. // Proceed. of the 8th Internat. Workshop on Structural Health Monitoring. Ed. Fu-Kuo, Stanford University, USA, 2011, pp. 378-385.
17. **Boldyrev G.G., Zhivaev A.A.** Vibration Level Assessment of Nuclear Power Plant Powerhouse Hall. // R. Allemang et al. (eds.), Special Topics in Structural Dynamics, Volume 6: Proceedings of the 31st IMAC, A Conference on Structural Dynamics, 2013, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 43.
18. **Максименко Л.А.** Современные методы мониторинга технического состояния здания. // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2015, №4, том 3, с. 200-203.
19. Требования к техническим средствам и системам комплексного обеспечения безопасности, автоматизации и связи многофункциональных высотных комплексов. Пособие для специалистов проектных и монтажных организаций, заказчиков, страховых компаний, инвесторов и контролирующих органов. – М., 2005.
20. **Живаев А.С.** Мониторинг строительных конструкций. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – «Строительные конструкции, здания и сооружения». Пенза: ПГУАС, 2011. – 194 с.
21. **Болдырев Г.Г., Епинин Е.С.** Целесообразность применения автоматизированных систем мониторинга для оценки текущего состояния строительных конструкций зданий и сооружений. // Атомное строительство, 2013, №15, с. 28-32.
22. **Горпинченко В.М., Егоров М.И.** Мониторинг эксплуатационной пригодности особо ответственных, сложных и уникальных сооружений. // Промышленное и гражданское строительство, № 10, 2004.
23. **Белостоцкий А.М., Акимов П.А.** Обзорно-аналитическое исследование нормативно-методической литературы в области мониторинга зданий и сооружений. // International Journal for Computa-

tional Civil and Structural Engineering, 2016, Volume 12, Issue 2, pp. 42-64.
24. **Негрозов О.А., Акимов П.А.** Об одном примере расчета тонкой пластины на основе совместного применения метода конечных элементов и дискретно-континуального метода конечных элементов. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2016, Volume 12, Issue 2, pp. 14-41.
25. **Белостоцкий А.М., Акимов П.А.** Научно-исследовательский центр СтаДиО. 25 лет на фронте численного моделирования. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2016, Volume 12, Issue 1, pp. 8-45.
26. **Акимов П.А., Белостоцкий А.М.** Об одном примере расчета трехмерного бруса на основе совместного применения метода конечных элементов и дискретно-континуального метода конечных элементов. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2016, Volume 12, Issue 1, pp. 46-72.

Белостоцкий Александр Михайлович, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО», профессор кафедры прикладной математики, заместитель директора Научно-образовательного центра компьютерного моделирования Национального исследовательского Московского государственного строительного университета; 125040, Россия, г. Москва ул. 3-я Ямского Поля, д.18, 8 этаж, офис 810, тел. +7 (495) 706-88-10, e-mail: stadyo@stadyo.ru, niccm@mgsu.ru.

Акимов Павел Алексеевич, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук; главный ученый секретарь РААСН; заместитель генерального директора по науке ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО», профессор кафедры прикладной математики Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ); 107031, г. Москва, ул. Большая Дмитровка, д. 24, стр. 1; тел. +7(495) 625-71-63; факс +7 (495) 650-27-31; e-mail: akimov@raasn.ru, pavel.akimov@gmail.com.

Alexander M. Belostotsky, Corresponding Member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dr.Sc, Professor, Vice Director of StaDyO Research & Engineering Center; Science Director of Research & Education Center of Computation Simulation, Department of Applied Mathematics, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia; phone/fax: +7 (499) 929-50-17; e-mail: stadyo@stadyo.ru, niccm@mgsu.ru.

Pavel A. Akimov, Corresponding Member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, PhD, Professor, Chief Scientific Secretary of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; StaDyO Research & Engineering Center; Department of Applied Mathematics, Moscow State University of Civil Engineering; 24, Ul. Bolshaya Dmitrovka, 107031, Moscow, Russia; phone +7(495) 625-71-63; fax: +7 (495) 650-27-31; e-mail: akimov@raasn.ru, pavel.akimov@gmail.com.

DOI:10.22337/1524-5845-2016-12-3-35-39

КОНСТРУКТИВНАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ. ОДНОСТОРОННИЕ СВЯЗИ. ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ

А.С. Городецкий, Д.А. Городецкий, А.В. Пикуль
ООО «ЛИРА САПР», г. Киев, УКРАИНА

Аннотация: Рассматриваются различные виды конструктивной нелинейности. Особое внимание уделяется проблеме односторонних связей. Приводится универсальный алгоритм расчета систем включающих односторонние связи. Приводится решение некоторых задач, для которых известные методы не приводят к необходимому результату.

Ключевые слова: конструктивная нелинейность, односторонние связи, универсальный алгоритм, нелинейные зависимости, усилие, перемещение, итерационный метод

STRUCTURAL NONLINEARITY. ONE-WAY RESTRAINTS. IMPLEMENTATION ISSUES

Alexander S. Gorodetsky, Dmitry A. Gorodetsky, Anatol V. Pikul
"LIRA SAPR" Ltd., Kiev, UKRAINE

Abstract: The paper focuses on different types of structural nonlinearity. Particular emphasis is given to one-way restraints. The universal algorithm for analysis of systems with one-way restraints is presented. The paper also provides solution for some problems where known methods do not produce necessary results.

Keywords: structural nonlinearity, one-way restraints, universal algorithm, nonlinear dependence, force, displacement, iteration method

Конструктивная нелинейность обуславливается свойством отдельных элементов конструкции включаться в работу в зависимости от различных факторов напряженно–деформированного состояния:

- усилия в элементе – элемент работает только на сжатие или на растяжение;
- элемент включается в работу после выбора зазора;
- элемент выключается из работы после достижения каких-либо факторов (например, после достижения предельного усилия).

Конструктивная нелинейность может быть сведена к нелинейной зависимости между усилиями и перемещениями (рис. 1, 2):



а) б)

Рисунок 1. Зависимости N – Δ для различных типов конструктивной нелинейности: а) элемент работает только на сжатие; б) элемент работает только на растяжение

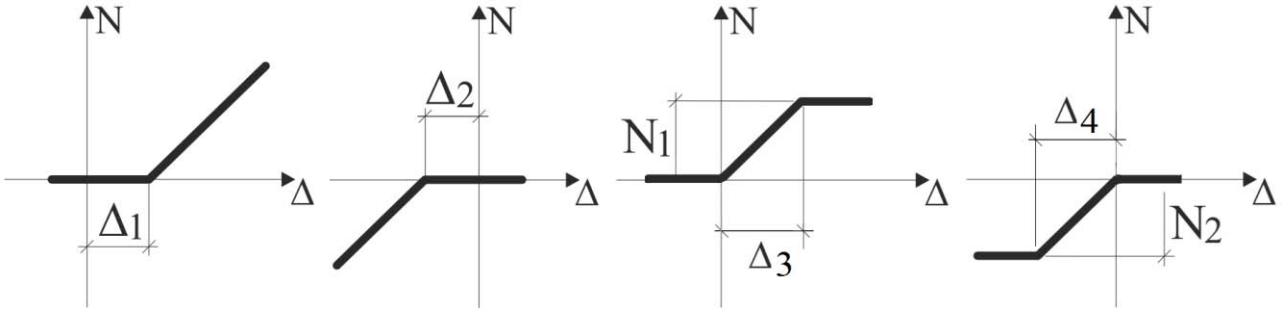


Рисунок 2. Зависимости N – Δ для различных типов конструктивной нелинейности: а) элемент включается в работу на растяжение после выбора зазора $Δ_1$; б) элемент включается в работу на сжатие после выбора зазора $Δ_2$; в) элемент работает только на растяжение и выключается из работы после достижения растягивающего усилия N_1; г) элемент работает только на сжатие и выключается из работы после достижения сжимающего усилия N_2.

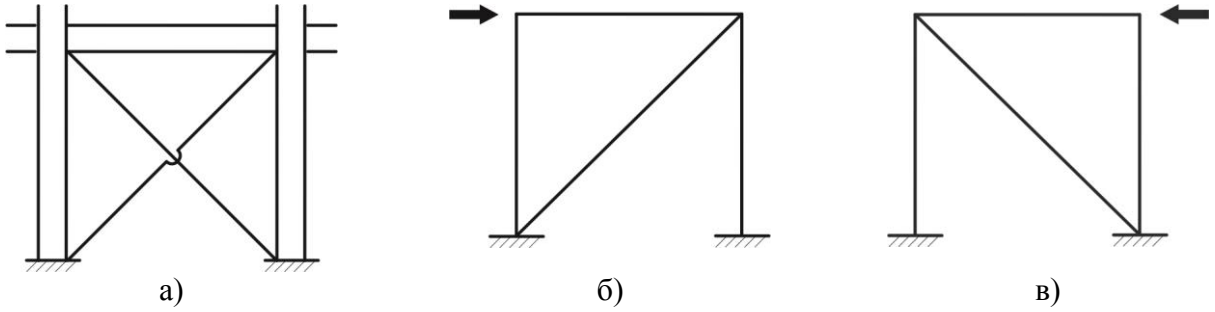


Рисунок 3. Конструктивная схема крестовых связей: а) схема вертикальных связей; б) расчетная схема при нагрузке слева; в) расчетная схема при нагрузке справа

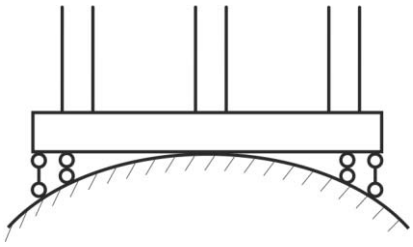


Рисунок 4. Фундаментная конструкция на подрабатываемых территориях.

На рис. 3 а приведен пример вертикальных связей по колоннам промышленных цехов выполненных в виде двух непересекающихся тяжей, которые воспринимают только растягивающие усилия. Поэтому различным направлениям горизонтальной нагрузки соответствуют различные расчетные схемы (рис. 3 б, 3 в).

Зависимость $N – Δ$ для тяжей в этом случае будет соответствовать рис. 1 б.

На рис. 4 представлена схема характерная для задач расчета зданий на подрабатываемых территориях. По мере обжатия грунта в работу будут включаться новые участки грунта. Зависимость $N – Δ$ в этом случае будет соответствовать рис. 2 б.

Эту задачу можно отнести к классу контактных задач, которые часто встречаются в строительной практике.

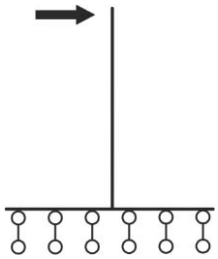


Рисунок 5. Фундаментная конструкция высотных сооружений.

На рис. 5 представлена схема характерная для фундаментов под высотные конструкции (башни, трубы, опоры ЛЭП, фундаменты под опоры ветроагрегатов и др.).

Конструкции фундаментов в этих случаях необходимо проверять на отрыв. Зависимость $N-\Delta$ для элементов моделирующих грунтовое основание соответствует рис. 1 а.

На рис. 6 представлена схема характерная для конструкций мачт с вантами. Ванты работают только на растяжение и включаются в работу после определенного уменьшения провиса f. Зависимость $N-\Delta$ в этом случае будет соответствовать рис. 2 а. Наличие предварительного натяжения, которое практически всегда присутствует в конструкциях такого типа, несколько смягчает, но не исключает этот эффект. Предварительное натяжение обуславливает также возможность работы вант на определенную величину сжимающего усилия, примерно равную величине предварительного натяжения. После достижения этой величины ванта выключается из работы.

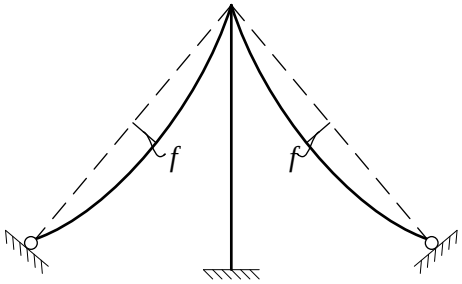


Рисунок 6. Конструкция мачты с вантами.

Зависимость $N-\Delta$ в этом случае соответствует рис. 2 г. В ПК ЛИРА-САПР для решения задач подобного типа реализован шаговый метод.

Задачи с односторонними связями также относятся к классу задач конструктивной нелинейности.

Проблема расчета систем с односторонними связями (рис. 1 а, б) является достаточно сложной и ей уделялось и уделяется много внимания [1, 2, 3, 4, 5]. Наиболее естественный метод [1] расчета заключается в проведении ряда итераций, где на каждой последующей итерации исключаются связи с недопустимыми усилиями, полученными на предыдущей итерации. Такой метод часто приводит к зацикливанию, т.е. связи то включаются, то выключаются и путь к нахождению устоявшейся правильной окончательной схеме не может быть найден. В работе [3] приведен пример простейшей схемы (рис. 7) – все связи A, B, C работают только на сжатие – для которой приведенный выше метод приводит к зацикливанию.

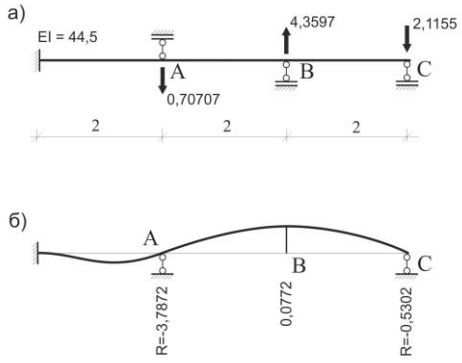


Рисунок 7. Тест № 1 а – рассчитываемая схема; б – точное решение.

В ПК ЛИРА-САПР реализован численный итерационный метод решения подобных задач. В основу положен модифицированный метод компенсирующих нагрузок. В отличие от реализаций в устаревшем процессоре прежних версий ПК ЛИРА, в ПК ЛИРА-САПР происходит автоматический выбор количества итераций в зависимости от заданной точности. Критерием достижения заданной точности является квадратичная невязка между реакциями в связях на $n+1$ и n итерациях.

Таблица 1. Результаты расчета схемы в зависимости от количества итераций.

Параметры решаемой задачи	Точное решение	Количество итераций		
		2400	10000	30000
Реакция A	3,7872	– 3,83	– 3,795	– 3,7871
Реакция C	0,5302	– 0,52	– 0,527	– 0,5301
Перемещение B	0,0772	0,0778	0,0773	0,7772

Пользователь по своему усмотрению сам может назначить количество итераций. В табл. 1 приведены результаты расчета схемы (рис. 7) в зависимости от количества итераций.

В работе [4] приведена схема (рис. 8) – все связи работают только на растяжение – которая при использовании метода [1] таит еще одну (кроме зацикливания) неприятность: уже после первой итерации схема превращается в геометрически изменяемую, и дальнейший расчет без каких-либо ухищрений невозможен.

На рис. 8 в приведено решение задачи итерационным методом (300 итераций), которое практически совпадает с точным решением. Элемент ABCD моделирован абсолютно жестким телом. ПК ЛИРА-САПР допускает применение в расчетных схемах произвольных абсолютно жестких тел с неограниченным количеством ведомых узлов. Решение большого количества практических задач итерационным методом ни разу не приводило к тупиковым ситуациям. Таким образом можно сделать осторожный вывод, что имеется универсальный алгоритм и программа для решения произвольных систем с односторонними связями.

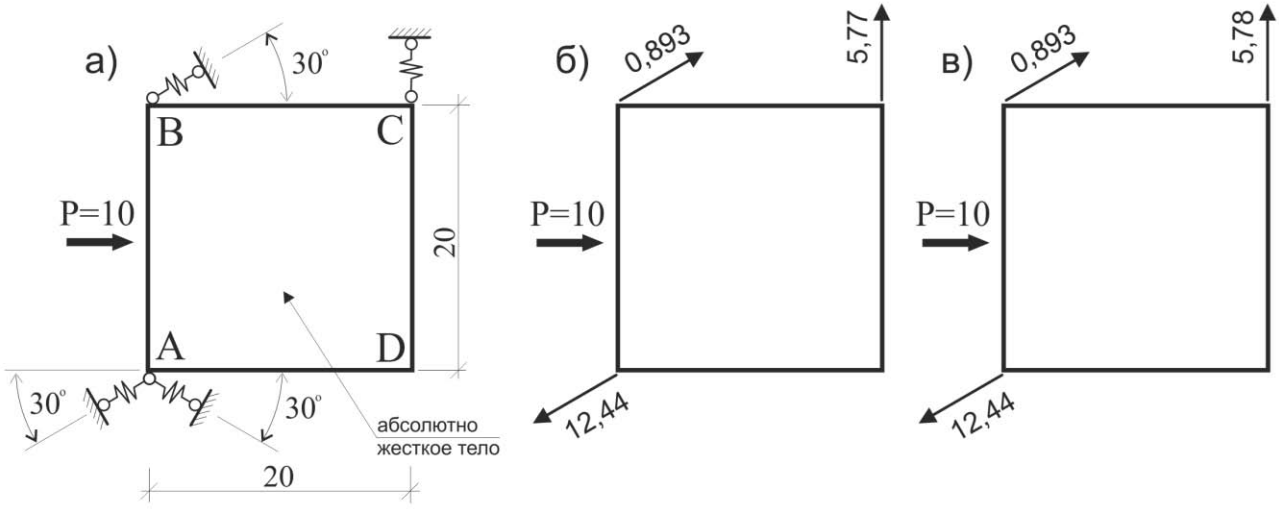


Рисунок 8. Тест № 2 а – рассчитываемая схема; б – точное решение; в – решение, полученное итерационным методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рабинович И.М.** Некоторые вопросы теории сооружений, содержащих односторонние связи // Инженерный сборник – М. – Л.: Издательство АН СССР, 1950.– Т.VI.
2. **Гордеев В.И., Перельмутер А.В**. Расчет упругих систем с односторонними связями, как задача квадратичного программирования // Исследования по тео-

рии сооружений. – М.: Стройиздат, 1966. – Вып. 15.
3. **Перельмутер А.В.** Элементы теории систем с односторонними связями. // Обзоры по вопросам проектирования металлических конструкций. – М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1969. – Вып. 3. – 127 с.
4. **Перельмутер А.В., Сливкер В.И.** Расчётные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 709 с.
5. **Вовкушевский А.В., Шойхет Б.А.** Расчет массивных гидротехнических сооружений с учетом раскрытия швов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 136 с.

Городецкий Александр Сергеевич, иностранный член Российской академии архитектуры и строительных наук, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе ООО «ЛИРА САПР», Украина, 04053 Киев, Кияновский переулок 7-а, тел.: +38 (050) 351 96 61
e-mail: info@liraland.com.ua, http: www.liraland.ru

Городецкий Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, главный специалист по программному обеспечению ООО «ЛИРА САПР», 04053 Украина, Киев, Кияновский переулок 7-а,
+38 (067) 259 81 21;
e-mail: info@liraland.com.ua, http: www.liraland.ru

Пикуль Анатолий Владимирович, инженер-аналитик ООО «ЛИРА САПР», ассистент кафедры металлических и деревянных конструкций Киевского национального университета строительства и архитектуры, 03037, Украина, г. Киев, Воздухофлотский проспект, 31; тел: +38(097)217-68-79
e-mail: Anatol.Pikul@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-1516-8266

Alexander S. Gorodetsky, Foreign Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, DSc, Professor, Deputy Director for Science of "LIRA SAPR» Ltd, 7a, Kiyanovsky side street (pereulok), Kiev, 04053, Ukraine, phone: +38 (050) 351 96 61;
e-mail: info@liraland.com.ua, http: www.liraland.ru

Dmitry A. Gorodetsky, PhD, Chief Expert of the software of "LIRA SAPR» Ltd, 7a, Kiyanovsky side street (pereulok), Kiev, 04053, Ukraine,
phone: +38 (067) 259 81 21;
e-mail: info@liraland.com.ua, http: www.liraland.ru

Anatol V. Pikul, Engineer-Analyst of "LIRA SAPR» Ltd, assistant of Department of Metal and Wood Structures at Kyiv National University of Contruction and Architekture, 31, Povitroflotsky Avenue, Kyiv, 03037, Ukraine;
phone:+38(097)217-68-79
e-mail: Anatol.Pikul@gmail.com
http://orcid.org/0000-0002-1516-8266

DOI:10.22337/1524-5845-2016-12-3-40-57

ОЦЕНИВАНИЕ МАТРИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ КВАДРАТИЧНОЙ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Р.Л. Лейбов
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: В статье рассмотрены особенности оценивания матричных параметров квадратичной модели по переходным процессам нелинейной модели объекта управления с помощью алгоритмов нелинейного программирования. Определен один из диапазонов возможного использования квадратичной модели нелинейного объекта. Приведены результаты применения предлагаемого подхода при создании квадратичной модели авиационного газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: нелинейный объект, квадратичная модель, переходные процессы нелинейной модели, алгоритмы нелинейного программирования, диапазон возможного использования квадратичной модели

NONLINEAR PLANT QUADRATIC MODEL MATRIX PARAMETERS ESTIMATION

Roman L. Leibov
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

Abstract: This paper presents a nonlinear plant quadratic model matrix parameters estimation technique using nonlinear model time responses and nonlinear programming. One of quadratic model application areas is defined. The results of proposed approach application for aircraft turbofan engine quadratic model formation are presented.

Keywords: Nonlinear plant, quadratic model, nonlinear model time responses, nonlinear programming, quadratic model application area

1. ВВЕДЕНИЕ

Для разработки алгоритмов обнаружения, локализации, конкретизации и парирования отказов систем автоматического управления (САУ) используются линейные модели нелинейных объектов управления. Матричные параметры линейных моделей оцениваются по переходным процессам нелинейных моделей объектов управления. Несколько линейных моделей, матричные параметры которых оцениваются согласованно, составляют кусочно-линейную модель нелинейного объекта. Квадратичная модель позволяет построить кусочно-линейную модель, состоящую из произвольного числа линейных моделей. Точность такой кусочно-линейной модели может быть максимально приближена к точности квадратичной модели. В данной работе рассматриваются структура, особенности оценивания матричных параметров и один из диапазонов возможного использования квадратичной модели нелинейного объекта управления.

2. НЕЛИНЕЙНАЯ, ЛИНЕЙНАЯ И КВАДРАТИЧНАЯ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Нелинейная модель объекта управления, имеет вид [1]

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}\left(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}\right). \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{x}$ – вектор состояния, $\mathbf{u}$ – вектор управления, $\mathbf{w}$ – вектор внешних воздействий, а $\mathbf{f}$ – нелинейная вещественная векторная функция. Координаты вектора состояния (переменные состояния) такого объекта управления, например авиационного газотурбинного двигателя (ГТД), это частоты вращения роторов, температуры и давления в различных сечениях проточной части двигателя. Координаты вектора управления (переменные управления) — это расход топлива, изменяемые геометрические характеристики проточной части двигателя, в частности, площадь критического сечения реактивного сопла и углы поворота направляющих аппаратов вентилятора и компрессора. Координаты вектора внешних воздействий (переменные внешних воздействий) это угол отклонения рычага управления двигателем (управляющее воздействие), а также высота и скорость полета (переменные внешних условий). Постоянные управляющее воздействие и внешние условия, входящие в вектор ${}_s\mathbf{w}$, определяют установившийся режим работы двигателя (рабочую точку), которому соответствуют вектор установившихся значений переменных управления ${}_s\mathbf{u}$ и вектор установившихся значений переменных состояния ${}_s\mathbf{x}$.

В небольшой окрестности произвольного r-ого установившегося режима нелинейный объект управления можно [1] приближенно описать с помощью линейной модели в нормированных отклонениях от установившихся значений

$$\dot{\mathbf{x}}^n = {}^r\mathbf{A}\left(\mathbf{x}^n - {}^r_s\mathbf{x}^n\right) + {}^r\mathbf{B}\left(\mathbf{u}^n - {}^r_s\mathbf{u}^n\right), \quad (2)$$

или

$$\dot{x}_i^n = {}^r_i\mathbf{a}\left(\mathbf{x}^n - {}^r_s\mathbf{x}^n\right) + {}^r_i\mathbf{b}\left(\mathbf{u}^n - {}^r_s\mathbf{u}^n\right), \quad i = 1,\ldots,n. \quad (3)$$

Здесь $\mathbf{x}^n$ – n-мерный вектор нормированных переменных состояния, а $\mathbf{u}^n$ – m-мерный вектор нормированных переменных управления

$$x_i^n = \frac{x_i}{\max\left|{}_s x_i\right|}, \quad i = 1,\ldots,n, \quad (4)$$

$$u_i^n = \frac{u_i}{\max\left|{}_s u_i\right|}, \quad i = 1,\ldots,m, \quad (5)$$

$${}^r\mathbf{A} = \begin{bmatrix} {}^r_1\mathbf{a} \\ \cdots \\ {}^r_n\mathbf{a} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$${}^r\mathbf{B} = \begin{bmatrix} {}^r_1\mathbf{b} \\ \cdots \\ {}^r_n\mathbf{b} \end{bmatrix} \quad (7)$$

матрицы динамической линейной модели для r-ого установившегося режима.

Для установившихся значений нормированных переменных состояния и управления справедливы соотношения

$$\mathbf{0} = {}^r\mathbf{A}\left({}_s\mathbf{x}^n - {}^r_s\mathbf{x}^n\right) + {}^r\mathbf{B}\left({}_s\mathbf{u}^n - {}^r_s\mathbf{u}^n\right), \quad (8)$$

$$\left({}_s\mathbf{x}^n - {}^r_s\mathbf{x}^n\right) = {}^r_{\mathbf{x}}\mathbf{S}\left({}_s\mathbf{u}^n - {}^r_s\mathbf{u}^n\right), \quad (9)$$

где ${}^r_{\mathbf{x}}\mathbf{S}$ — матрица статической линейной модели.

В окрестности произвольного r-ого установившегося режима нелинейный объект управления также можно приближенно описать с помощью квадратичной модели в нормированных отклонениях от установившихся значений [2], [3]

$$\dot{x}_i^n = {}^r_i\mathbf{a}\left(\mathbf{x}^n - {}^r_s\mathbf{x}^n\right) + {}^r_i\mathbf{b}\left(\mathbf{u}^n - {}^r_s\mathbf{u}^n\right) + \left(\mathbf{x}^n - {}^r_s\mathbf{x}^n\right)^T {}^r_i\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{x}}\left(\mathbf{x}^n - {}^r_s\mathbf{x}^n\right) + \left(\mathbf{u}^n - {}^r_s\mathbf{u}^n\right)^T {}^r_i\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{u}}\left(\mathbf{u}^n - {}^r_s\mathbf{u}^n\right), \quad i = 1,\ldots,n, \quad (10)$$

где

$$ {}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} {}^{r}_{i}\gamma^{\mathbf{x}}_{11} & {}^{r}_{i}\gamma^{\mathbf{x}}_{12} & \cdots & {}^{r}_{i}\gamma^{\mathbf{x}}_{1n} \\ 0 & {}^{r}_{i}\gamma^{\mathbf{x}}_{22} & \cdots & {}^{r}_{i}\gamma^{\mathbf{x}}_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & {}^{r}_{i}\gamma^{\mathbf{x}}_{nn} \end{bmatrix}, \quad i = 1,...,n, \quad (11) $$

$$ {}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} {}^{r}_{i}\gamma^{\mathbf{u}}_{11} & {}^{r}_{i}\gamma^{\mathbf{u}}_{12} & \cdots & {}^{r}_{i}\gamma^{\mathbf{u}}_{1m} \\ 0 & {}^{r}_{i}\gamma^{\mathbf{u}}_{22} & \cdots & {}^{r}_{i}\gamma^{\mathbf{u}}_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & {}^{r}_{i}\gamma^{\mathbf{u}}_{mm} \end{bmatrix}, \quad i = 1,...,n. \quad (12) $$

В этом описании есть все возможные пары сомножителей, но только один коэффициент при каждой из пар [2].

Производные [4] правых частей уравнений (10)

$$ \frac{d\left[{}^{r}_{i}\mathbf{a}\left(\mathbf{x}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{x}^{n}\right)\right]}{d\left(\mathbf{x}^{n}\right)^{T}} + \frac{d\left[{}^{r}_{i}\mathbf{b}\left(\mathbf{u}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{u}^{n}\right)\right]}{d\left(\mathbf{x}^{n}\right)^{T}} + \frac{d\left[\left(\mathbf{x}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{x}^{n}\right)^{T} {}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{x}}\left(\mathbf{x}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{x}^{n}\right)\right]}{d\left(\mathbf{x}^{n}\right)^{T}} + \frac{d\left[\left(\mathbf{u}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{u}^{n}\right)^{T} {}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{u}}\left(\mathbf{u}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{u}^{n}\right)\right]}{d\left(\mathbf{x}^{n}\right)^{T}} = {}^{r}_{i}\mathbf{a} + \left(\mathbf{x}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{x}^{n}\right)^{T}\left({}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{x}^{T}} + {}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{x}}\right), \quad i = 1,...,n, \quad (13) $$

$$ \frac{d\left[{}^{r}_{i}\mathbf{a}\left(\mathbf{x}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{x}^{n}\right)\right]}{d\left(\mathbf{u}^{n}\right)^{T}} + \frac{d\left[{}^{r}_{i}\mathbf{b}\left(\mathbf{u}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{u}^{n}\right)\right]}{d\left(\mathbf{u}^{n}\right)^{T}} + \frac{d\left[\left(\mathbf{x}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{x}^{n}\right)^{T} {}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{x}}\left(\mathbf{x}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{x}^{n}\right)\right]}{d\left(\mathbf{u}^{n}\right)^{T}} + \frac{d\left[\left(\mathbf{u}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{u}^{n}\right)^{T} {}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{u}}\left(\mathbf{u}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{u}^{n}\right)\right]}{d\left(\mathbf{u}^{n}\right)^{T}} = {}^{r}_{i}\mathbf{b} + \left(\mathbf{u}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{u}^{n}\right)^{T}\left({}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{u}^{T}} + {}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{u}}\right), \quad i = 1,...,n. \quad (14) $$

Значения этих производных в точке

$$ \begin{bmatrix} {}^{r}_{s}\mathbf{x}^{n} \\ {}^{r}_{s}\mathbf{u}^{n} \end{bmatrix} $$

будут равны ${}^{r}_{i}\mathbf{a}$, ${}^{r}_{i}\mathbf{b}$, $i = 1,...,n$, а значения самих правых частей в этой точке должны быть нулевыми.

Таким образом, *r*-ому установившемуся режиму соответствуют линейная модель (3), а соседнему установившемуся режиму в точке

$$ \begin{bmatrix} {}^{r-1}_{s}\mathbf{x}^{n} \\ {}^{r-1}_{s}\mathbf{u}^{n} \end{bmatrix} $$

линейная модель, матрицы которой

$$ {}^{r-1}_{i}\mathbf{a} = {}^{r}_{i}\mathbf{a} + \left({}^{r-1}_{s}\mathbf{x}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{x}^{n}\right)^{T}\left({}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{x}^{T}} + {}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{x}}\right), \quad i = 1,...,n, \quad (15) $$

$$ {}^{r-1}_{i}\mathbf{b} = {}^{r}_{i}\mathbf{b} + \left({}^{r-1}_{s}\mathbf{u}^{n} - {}^{r}_{s}\mathbf{u}^{n}\right)^{T}\left({}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{u}^{T}} + {}^{r}_{i}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{u}}\right), \quad i = 1,...,n. \quad (16) $$

Об устойчивости квадратичной модели косвенно можно судить по собственным значениям матрицы ${}^{r-1}\mathbf{A}$.

3. ОЦЕНИВАНИЕ МАТРИЦ КВАДРАТИЧНОЙ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА

Для оценивания матриц квадратичной модели, соответствующей *r*-ому и еще нескольким соседним установившимся режимам, используются переходные процессы нелинейной модели объекта, то есть наборы значений нормированного вектора состояния и его первой производной $\mathbf{x}^{\text{НЛ}n}(t_k)$, $\dot{\mathbf{x}}^{\text{НЛ}n}(t_k)$, $k = 0,...,N$, а также нормированного вектора управления $\mathbf{u}^{\text{НЛ}n}(t_k)$, $k = 0,...,N-1$ в дискретные моменты времени $t_0, t_1, t_2, \ldots, t_k, t_{k+1}, \ldots$, причем $t_{k+1} = t_k + \Delta t$, где Δt это шаг дискретности.

Переходные процессы для переменных управления в разомкнутой системе управления представляют собой несколько последовательных ступенчатых воздействий, вклю-

чающих в себя линейные функции времени, наклоны которых примерно соответствует переходным процессам в замкнутой системе управления. Эти линейные функции соединяют значения, соответствующие нескольким соседним установившимся режимам.

Оценивание матриц квадратичной модели может быть сведено к задаче нелинейного программирования вида

$$
{}_1^r\boldsymbol{\Gamma}^{\mathbf{x}},\ldots,{}_n^r\boldsymbol{\Gamma}^{\mathbf{x}},\ {}_1^r\boldsymbol{\Gamma}^{\mathbf{u}},\ldots,{}_n^r\boldsymbol{\Gamma}^{\mathbf{u}}:
$$

$$
\min\left\{\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N}\left[\mathbf{x}^n(t_k)-\mathbf{x}^n(t_k)\right]^T{}_{\mathbf{x}}\mathbf{W}(t_k)}{\sum_{k=1}^{N}\left[\mathbf{x}^{\text{НЛ}n}(t_k)-\mathbf{x}^{\text{НЛ}n}(t_0)\right]^T{}_{\mathbf{x}}\mathbf{W}(t_k)}}\ \middle|\ \frac{\left[\mathbf{x}^n(t_k)-\mathbf{x}^{\text{НЛ}n}(t_k)\right]}{\left[\mathbf{x}^{\text{НЛ}n}(t_k)-\mathbf{x}^{\text{НЛ}n}(t_0)\right]}\right|
$$

$$
\left.\begin{aligned}
&\dot{x}_i^n(t_k)=\\
&{}_i^r\mathbf{a}\left[\mathbf{x}^n(t_k)-{}_s^r\mathbf{x}^n\right]+{}_i^r\mathbf{b}\left[\mathbf{u}^{\text{НЛ}n}(t_k)-{}_s^r\mathbf{u}^n\right]+\\
&\left[\mathbf{x}^n(t_k)-{}_s^r\mathbf{x}^n\right]^T{}_i^r\boldsymbol{\Gamma}^{\mathbf{x}}\left[\mathbf{x}^n(t_k)-{}_s^r\mathbf{x}^n\right]+\\
&\left[\mathbf{u}^{\text{НЛ}n}(t_k)-{}_s^r\mathbf{u}^n\right]^T{}_i^r\boldsymbol{\Gamma}^{\mathbf{u}}\left[\mathbf{u}^{\text{НЛ}n}(t_k)-{}_s^r\mathbf{u}^n\right],\\
&x_i^n(t_{k+1})=x_i^n(t_k)+\Delta t\,\dot{x}_i^n(t_k),\\
&\qquad i=1,\ldots,n,\quad k=0,1,\ldots,N-1
\end{aligned}\right\}. \qquad (17)
$$

Здесь ${}_{\mathbf{x}}\mathbf{W}(t_k),\quad k=1,\ldots,N$ положительно определенные диагональные весовые матрицы, матрицы ${}^r\mathbf{A}$ и ${}^r\mathbf{B}$ считаются известными, начальные значения матриц ${}_i^r\boldsymbol{\Gamma}^{\mathbf{x}}=\mathbf{0}$, ${}_i^r\boldsymbol{\Gamma}^{\mathbf{u}}=\mathbf{0}$, $i=1,\ldots,n$, а начальное значение вектора состояния квадратичной модели $\mathbf{x}^n(t_0)=\mathbf{x}^{\text{НЛ}n}(t_0)$.

Ошибки квадратичной модели рассчитываются по каждой из переменных состояния

$$
{}_i\Delta_2=\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N}\left[x_i^n(t_k)-x_i^{\text{НЛ}n}(t_k)\right]^2}{\sum_{k=1}^{N}\left[x_i^{\text{НЛ}n}(t_k)-x_i^{\text{НЛ}n}(t_0)\right]^2}},\quad i=1,\ldots,n, \qquad (18)
$$

или

$$
{}_i\Delta_\infty=\max_{k=1,\ldots,N}\left|x_i^n(t_k)-x_i^{\text{НЛ}n}(t_k)\right|,\quad i=1,\ldots,n. \qquad (19)
$$

4. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР ОЦЕНИВАНИЯ МАТРИЦ КВАДРАТИЧНОЙ МОДЕЛИ

Разработанный метод применяется для определения матриц квадратичной модели по переходным процессам нелинейной модели двухвального двухконтурного турбореактивного авиационного ГТД в разомкнутой САУ. Переходные процессы нелинейной модели начинаются на установившемся режиме, соответствующем максимальному режиму работы при значении угла отклонения рычага управления двигателем $\alpha_{\text{руд}}=68^\circ$, а затем соответствуют переходным процессам для переменных управления в разомкнутой системе, которые представляют собой несколько последовательных ступенчатых воздействий. Каждое из этих воздействий соответствует изменению значения угла отклонения рычага управления двигателем $\alpha_{\text{руд}}=60^\circ$, $\alpha_{\text{руд}}=50^\circ$, $\alpha_{\text{руд}}=40^\circ$, $\alpha_{\text{руд}}=30^\circ$, $\alpha_{\text{руд}}=25^\circ$.

В рассматриваемом примере высота и скорость полета равны нулю. Четыре переменные управления (m=4) соответствуют расходу топлива в основной камере сгорания $G_{\text{то}}$, площади критического сечения реактивного сопла $F_{\text{кр}}$, углу поворота направляющих аппаратов вентилятора $\varphi_{\text{нав}}$ и углу поворота направляющих аппаратов компрессора $\varphi_{\text{нак}}$. Пять переменных состояния объекта управления (n=5) соответствуют частоте вращения вентилятора двигателя $n_{\text{в}}$, частоте вращения

компрессора двигателя $n_{\text{к}}$, давлению торможения за компрессором $P_{\text{к}}^{*}$, давлению торможения за турбиной $P_{\text{т}}^{*}$ и температуре торможения за турбиной $T_{\text{т}}^{*}$.

Вектора нормированных установившихся значений управления и состояния для перечисленных выше режимов

$$
\begin{aligned}
&{}^{r}_{s}\mathbf{u}^{n} = [1,\ 0.4515,\ 0,\ 0]^{T},\\
&{}^{r}_{s}\mathbf{x}^{n} = [1,\ 1,\ 1,\ 1,\ 1]^{T},\\
&{}^{r-1}_{s}\mathbf{u}^{n} = [0.9442,\ 0.4441,\ -0.0893,\ 0]^{T},\\
&{}^{r-1}_{s}\mathbf{x}^{n} = [0.9741,\ 0.9834,\ 0.9656,\ 0.9783,\ 0.9790]^{T},\\
&{}^{r-2}_{s}\mathbf{u}^{n} = [0.7713,\ 0.4441,\ -0.3741,\ 0]^{T},\\
&{}^{r-2}_{s}\mathbf{x}^{n} = [0.9176,\ 0.9414,\ 0.8355,\ 0.8618,\ 0.9225]^{T},\\
&{}^{r-3}_{s}\mathbf{u}^{n} = [0.5724,\ 0.4441,\ -0.7402,\ -0.1072]^{T},\\
&{}^{r-3}_{s}\mathbf{x}^{n} = [0.8449,\ 0.8991,\ 0.6724,\ 0.7125,\ 0.8507]^{T},\\
&{}^{r-4}_{s}\mathbf{u}^{n} = [0.2880,\ 0.4441,\ -1,\ -0.2264]^{T},\\
&{}^{r-4}_{s}\mathbf{x}^{n} = [0.7231,\ 0.8399,\ 0.4505,\ 0.4787,\ 0.6900]^{T},\\
&{}^{r-5}_{s}\mathbf{u}^{n} = [0.1864,\ 0.4441,\ -1,\ -0.4019]^{T},\\
&{}^{r-5}_{s}\mathbf{x}^{n} = [0.6202,\ 0.7929,\ 0.3348,\ 0.3788,\ 0.6114]^{T}.
\end{aligned}
$$

Матрицы динамической линейной модели после уточнения матрицы статической линейной модели [2]

$$
{}^{r}\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
-1.8208 & 1.1770 & & & \\
0.0697 & -1.6507 & & & \\
9.7385 & 11.5191 & & & \\
9.6711 & 3.5115 & & & \\
2.9867 & -6.8163 & & & \\
0 & 0 & 0 & & \\
0 & 0 & 0 & & \\
-20.1171 & -13.1868 & 0 & & \\
-5.5917 & -19.3568 & 0 & & \\
-3.4159 & -3.1171 & -30.0422 & &
\end{bmatrix},
$$

$$
{}^{r}\mathbf{B} = \begin{bmatrix}
0.6093 & 0.8201 & -0.1387 & 0.1788 \\
0.4454 & 0.5736 & -0.0387 & -0.2204 \\
10.8333 & -40.9063 & 2.6207 & 1.7204 \\
7.1854 & -39.0036 & 2.1503 & 0.5060 \\
16.0831 & 3.7726 & -0.8053 & -1.2318
\end{bmatrix}.
$$

Собственные значения матрицы ${}^{r}\mathbf{A}$

$$
\begin{aligned}
&{}^{r}\lambda_{1} = -1.4370,\ {}^{r}\lambda_{2} = -2.0345,\\
&{}^{r}\lambda_{3} = -11.1415,\ {}^{r}\lambda_{4} = -28.3324,\\
&{}^{r}\lambda_{5} = -30.0422.
\end{aligned}
$$

Вначале с помощью (17) оцениваются элементы матриц

$$
{}^{r}_{1}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -0.0162 & -0.0181 \\ 0 & 0.0278 \end{bmatrix},
$$

$$
{}^{r}_{2}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -0.1089 & 0.0133 \\ 0 & -0.0417 \end{bmatrix},
$$

$$
{}^{r}_{1}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix}
-0.0319 & -0.1280 & 0.0823 & -0.2076 \\
0 & 0.1117 & 0.0651 & 0.1743 \\
0 & 0 & 0.0041 & 0.1553 \\
0 & 0 & 0 & -0.4165
\end{bmatrix},
$$

$$
{}^{r}_{2}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix}
-0.2445 & 0.0548 & 0.3299 & -0.1507 \\
0 & -0.0267 & 0.0975 & -0.0024 \\
0 & 0 & -0.0881 & -0.2008 \\
0 & 0 & 0 & 0.0639
\end{bmatrix}.
$$

Затем подобным же образом, но с учетом уже известных матриц квадратичной модели и соответствующих переходных процессов двух переменных состояния, оцениваются элементы матриц

$$
{}^{r}_{3}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix}
-1.2607 & 0.2927 & -1.6746 & -0.8985 \\
0 & 0.0186 & -0.2216 & -0.3720 \\
0 & 0 & 1.9339 & -0.5949 \\
0 & 0 & 0 & 2.4800
\end{bmatrix},
$$

$$
{}^{r}_{4}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix}
0.3141 & 0.2177 & 0.0014 & -2.5816 \\
0 & 0.7004 & 0.9653 & -0.9625 \\
0 & 0 & -1.1875 & -0.6546 \\
0 & 0 & 0 & -0.7394
\end{bmatrix},
$$

$$ {}_{3}^{r}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} -2.6416 & 0.1334 & -2.2222 & -1.0052 \\ 0 & 0.4733 & 0.1910 & -2.4470 \\ 0 & 0 & -0.7613 & 0.1514 \\ 0 & 0 & 0 & -1.5057 \end{bmatrix}, $$

$$ {}_{4}^{r}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} 0.6351 & 0.2250 & -0.5388 & 0.1228 \\ 0 & -3.3969 & -0.8555 & -0.2930 \\ 0 & 0 & -1.4348 & -1.3817 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3208 \end{bmatrix}. $$

Наконец, таким же образом оцениваются элементы матриц

$$ {}_{5}^{r}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0.0764 & -3.4153 \\ 0 & 0.4479 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} $$

$$ \begin{bmatrix} -0.4633 & -0.6979 & 0.2337 \\ -1.2369 & 0.8377 & 1.3469 \\ -0.9704 & -0.8798 & -0.5260 \\ 0 & -1.0099 & -1.5035 \\ 0 & 0 & -0.1620 \end{bmatrix}, $$

$$ {}_{5}^{r}\mathbf{\Gamma}^{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} -1.5124 & 0.9865 & 0.3452 & -2.4686 \\ 0 & 1.2401 & 0.2039 & 0.5581 \\ 0 & 0 & 0.3440 & -1.4374 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9207 \end{bmatrix}. $$

При оценивании $k = 1,...,2001$, $\Delta t = 0.025$, а весовые матрицы единичные. Кроме того используются дополнительные ограничения, которые необходимы для того, чтобы собственные значения матриц линейных моделей ${}^{r-1}\mathbf{A}$, ${}^{r-2}\mathbf{A}$, ${}^{r-3}\mathbf{A}$, ${}^{r-4}\mathbf{A}$, ${}^{r-5}\mathbf{A}$, которые могут быть рассчитаны с помощью квадратичной модели для соответствующих установившихся режимов, были вещественными, отрицательными и различными.

$$ {}^{r-1}\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1.8197 & 1.1765 \\ 0.0751 & -1.6497 \\ 9.8760 & 11.5266 \\ 9.7072 & 3.4703 \\ 3.0656 & -6.7466 \end{bmatrix} $$

$$ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -20.1902 & -13.2445 & 0 \\ -5.5119 & -19.2194 & 0 \\ -3.2865 & -3.0073 & -30.0131 \end{bmatrix}, $$

$$ {}^{r-1}\mathbf{B} = $$

$$ \begin{bmatrix} 0.6065 & 0.8198 & -0.1445 & 0.1752 \\ 0.4428 & 0.5622 & -0.0421 & -0.1941 \\ 11.3250 & -40.9378 & 2.8790 & 1.7846 \\ 7.1611 & -38.8895 & 2.4429 & 0.6247 \\ 16.2135 & 3.6811 & -0.8875 & -0.6247 \end{bmatrix}, $$

$$ {}^{r-1}\lambda_1 = -1.4255,\ {}^{r-1}\lambda_2 = -2.0439, $$

$$ {}^{r-1}\lambda_3 = -11.1469,\ {}^{r-1}\lambda_4 = -28.2627, $$

$$ {}^{r-1}\lambda_5 = -30.0131, $$

$$ {}^{r-2}\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1.8171 & 1.1752 \\ 0.0869 & -1.6469 \\ 10.3288 & 11.5807 \\ 9.9631 & 3.3857 \\ 3.6251 & -6.4137 \end{bmatrix} $$

$$ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -20.5202 & -13.6786 & 0 \\ -5.1672 & -18.7756 & 0 \\ -2.2519 & -2.0000 & -29.5614 \end{bmatrix}, $$

$$ {}^{r-2}\mathbf{B} = $$

$$ \begin{bmatrix} 0.5940 & 0.8234 & -0.1611 & 0.1669 \\ 0.4334 & 0.5250 & -0.0489 & -0.1108 \\ 12.8714 & -41.0153 & 3.6969 & 1.9153 \\ 7.0949 & -38.5847 & 3.3533 & 0.9970 \\ 16.6381 & 3.4524 & -1.1431 & -0.1339 \end{bmatrix}, $$

$$ {}^{r-2}\lambda_1 = -1.4013,\ {}^{r-2}\lambda_2 = -2.0626, $$

$$ {}^{r-2}\lambda_3 = -11.1956,\ {}^{r-2}\lambda_4 = -28.1002, $$

$$ {}^{r-2}\lambda_5 = -29.5614, $$

$$ {}^{r-3}\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1.8139 & 1.1742 \\ 0.1021 & -1.6443 \\ 10.9070 & 11.6495 \\ 10.2935 & 3.2969 \\ 2.9867 & -6.8163 \end{bmatrix} $$

$$ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -20.9311 & -14.2410 & 0 \\ -4.7231 & -18.2197 & 0 \\ -3.4159 & -3.1171 & -30.0422 \end{bmatrix}, $$

$$ {}^{r-3}\mathbf{B} = $$

$$ \begin{bmatrix} 0.5989 & 0.8063 & -0.1971 & 0.2406 \\ 0.4260 & 0.4787 & -0.0285 & -0.0210 \\ 14.8435 & -40.8494 & 4.6801 & 2.3826 \\ 7.0264 & -38.3849 & 4.6592 & 1.4096 \\ 17.3780 & 3.1218 & -1.3096 & 0.6860 \end{bmatrix}, $$

$^{r-3}\lambda_1 = -1.3726,\ ^{r-3}\lambda_2 = -2.0857,$

$^{r-3}\lambda_3 = -11.2628,\ ^{r-3}\lambda_4 = -27.8880,$

$^{r-3}\lambda_5 = -30.0422,$

$$^{r-4}\mathbf{A} = \begin{vmatrix} -1.8089 & 1.1731 \\ 0.1279 & -1.6410 \\ 11.7784 & 11.7478 \\ 10.8073 & 3.1983 \\ 4.0371 & -6.1886 \end{vmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -21.4332 & -15.1372 & 0 \\ -4.1003 & -17.3573 & 0 \\ -1.4014 & -1.0555 & -29.1493 \end{bmatrix},$$

$$^{r-4}\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.6204 & 0.8050 & -0.2411 & 0.3586 \\ 0.4973 & 0.4380 & -0.0526 & 0.0588 \\ 17.7564 & -40.2294 & 5.8888 & 3.6187 \\ 6.7905 & -38.1917 & 5.7226 & 1.6572 \\ 18.4429 & 2.7217 & -1.4152 & 1.5420 \end{bmatrix},$$

$^{r-4}\lambda_1 = -1.3287,\ ^{r-4}\lambda_2 = -2.1213,$

$^{r-4}\lambda_3 = -11.2576,\ ^{r-4}\lambda_4 = -27.5328,$

$^{r-4}\lambda_5 = -29.1493,$

$$^{r-5}\mathbf{A} = \begin{vmatrix} -1.8047 & 1.1724 \\ 0.1497 & -1.6385 \\ 12.3076 & 11.7787 \\ 10.9902 & 3.0945 \\ 4.2869 & -5.9257 \end{vmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -21.6385 & -15.4539 & 0 \\ -3.8057 & -16.8229 & 0 \\ -0.9418 & -0.6013 & -29.0001 \end{bmatrix},$$

$$^{r-5}\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.6633 & 0.7874 & -0.2767 & 0.5259 \\ 0.5735 & 0.4329 & -0.0509 & 0.0516 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6.6399 & -38.11631 & 6.0198 & 1.5321 \\ 19.1834 & 2.5235 & -1.1980 & 1.4697 \end{bmatrix},$$

$^{r-5}\lambda_1 = -1.2946,\ ^{r-5}\lambda_2 = -2.1487,$

$^{r-5}\lambda_3 = -11.1927,\ ^{r-5}\lambda_4 = -27.2687,$

$^{r-5}\lambda_5 = -29.0001.$

На рис. 1-9 показаны переходные процессы нормированных переменных управления u_1^n, u_2^n, u_3^n, u_4^n и переходные процессы нормированных переменных состояния x_1^n, x_2^n, x_3^n, x_4^n, x_5^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели, которая описывает нелинейный объект в окрестностях пяти соседних установившихся режимов. На рис. 10 показаны переходные процессы нормированной переменной состояния x_1^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели, которая описывает нелинейный объект в окрестностях шести соседних установившихся режимов. В этом случае ошибка квадратичной модели уже является неприемлемой.

Ошибки квадратичной модели по каждой из переменных состояния рассчитываются с помощью (18).

К сожалению, проверка этой квадратичной модели с помощью переходных процессов в замкнутой САУ показывает, что она хорошо описывает нелинейный объект только в окрестностях трех соседних установившихся режимов. Переходные процессы нормированных переменных управления u_1^n, u_2^n, u_3^n, u_4^n и переходные процессы нормированных переменных состояния x_1^n, x_2^n, x_3^n, x_4^n, x_5^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели в замкнутой САУ в окрестностях трех соседних установившихся режимов показаны на рис. 11-19. А на рис. 20 показаны переходные процессы нормированной переменной состояния x_4^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели в замкнутой САУ в окрестностях четырех установившихся режимов. Видно, что в этом случае ошибка квадратичной модели неприемлема.

Ошибки квадратичной модели по каждой из переменных состояния в замкнутой САУ рассчитываются с помощью (19).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика оценивания матричных параметров квадратичной модели нелинейного объекта управления.
В качестве исходных данных для оценивания матриц квадратичной модели с помощью алгоритмов нелинейного программирования, используются переходные процессы переменных управления и переменных состояния нелинейной модели объекта.
Результаты данной работы могут быть применены при разработке систем управления нелинейными объектами, которые приближенно описываются с помощью квадратичных и кусочно-линейных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лейбов Р.Л.** Прикладные методы теории управления – М. : АСВ, 2014. – 192 с.
2. **Лейбов Р.Л.** Оценивание матричных параметров билинейной модели нелинейного объекта управления // Вопросы прикладной математики и вычислительной механики : сб. научн. тр. № 18. М.: МГСУ, 2015, с. 276-305.
3. **Лейбов Р.Л.** Использование билинейной модели для улучшения свойств кусочно-линейной модели нелинейного объекта управления. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2015, Volume 11, Issue 2, pp. 107-130.
4. **Чаки Ф.** Современная теория управления –М.: Мир, 1975. – 424 с.

Лейбов Роман Львович, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26, тел./факс: +7(499) 183-59-94,
e-mail: r_leibov@mtu-net.ru

Roman L. Leibov, Dr.Sc., Professor, Department of Applied Mathematics, Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Highway, 129337, Moscow, RUSSIA, phone/fax: +7(499) 183-59-94,
e-mail: r_leibov@mtu-net.ru

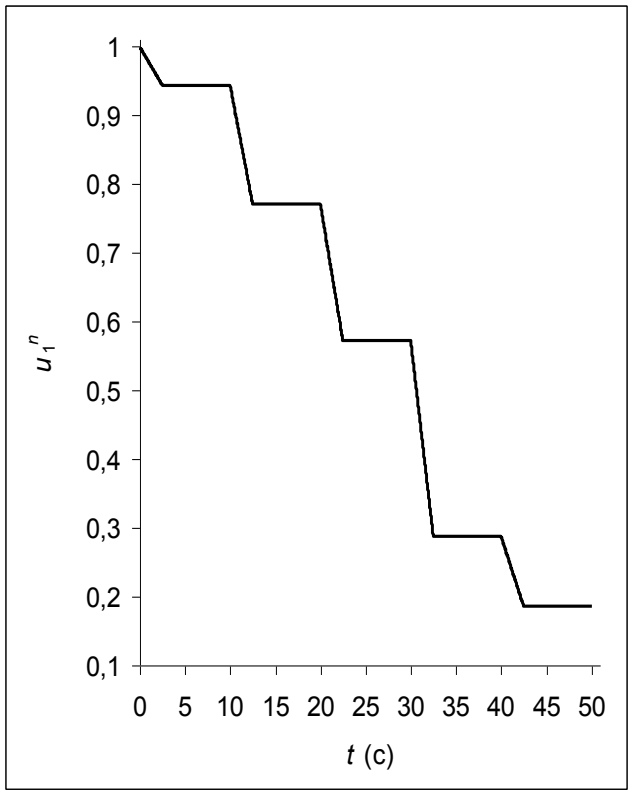


Рисунок 1. Переходный процесс нормированной переменной управления u_1^n.

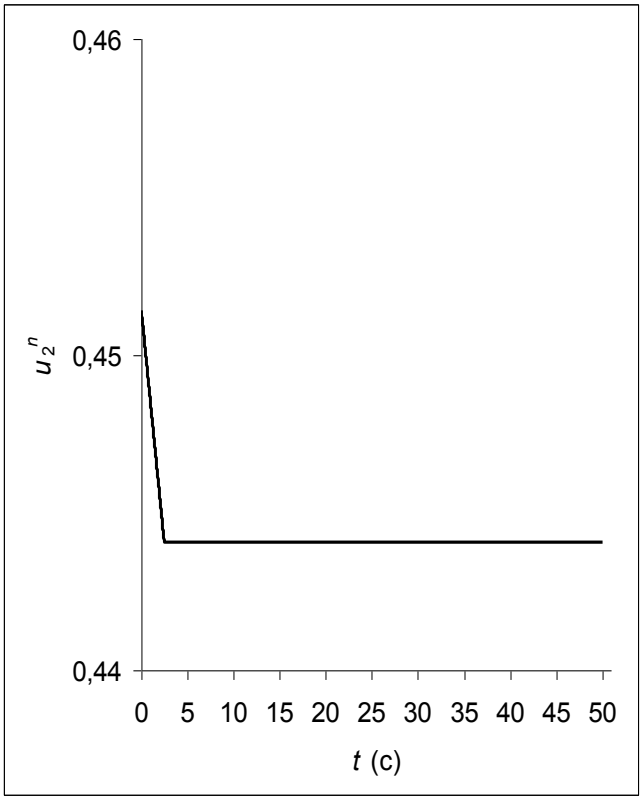


Рисунок 2. Переходный процесс нормированной переменной управления u_2^n.

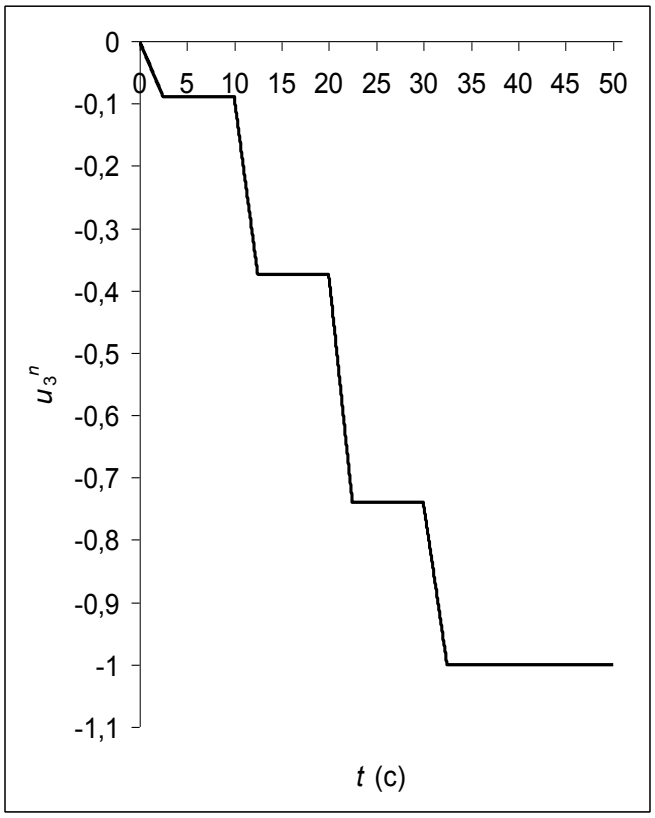


Рисунок 3. Переходный процесс нормированной переменной управления u_3^n.

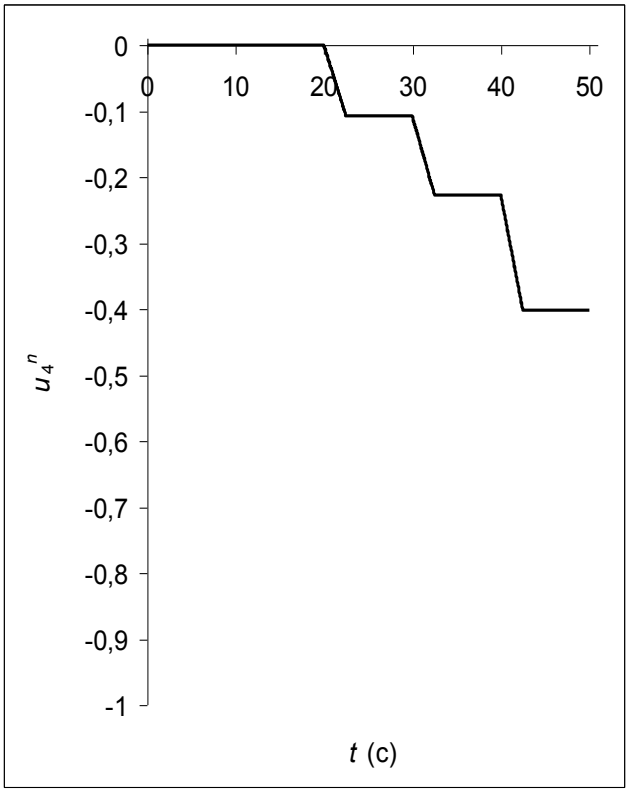


Рисунок 4. Переходный процесс нормированной переменной управления u_4^n.

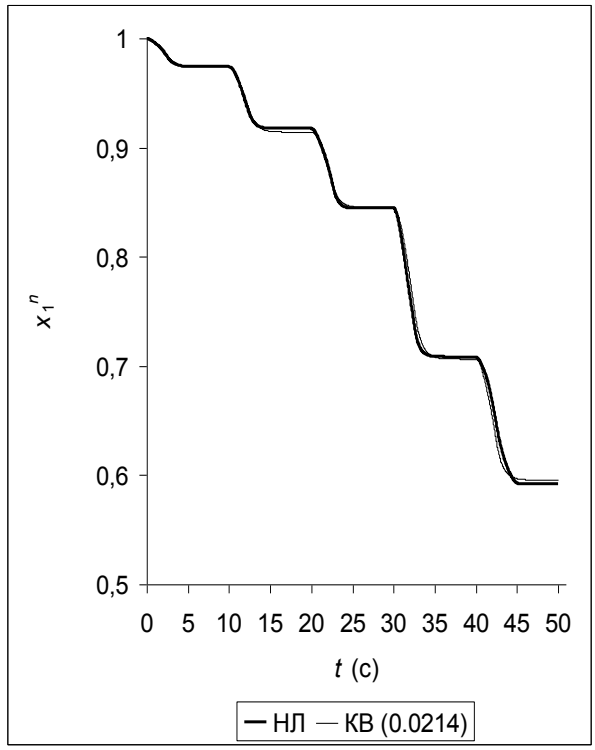


Рисунок 5. Переходные процессы нормированной переменной состояния x_1^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели, которая описывает нелинейный объект в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

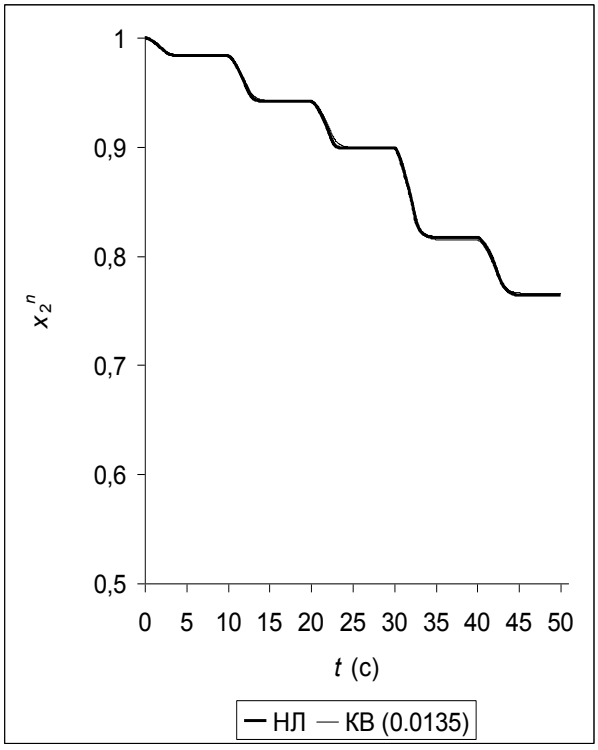


Рисунок 6. Переходные процессы нормированной переменной состояния x_2^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели, которая описывает нелинейный объект в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

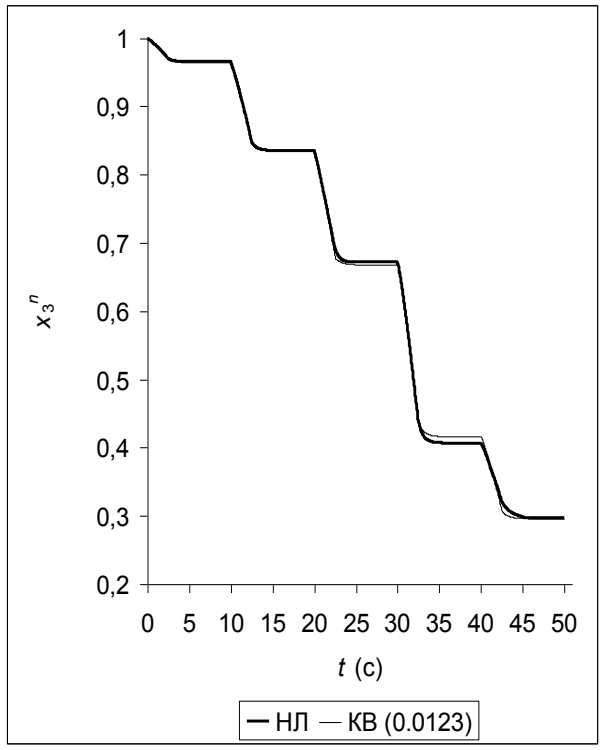


Рисунок 7. Переходные процессы нормированной переменной состояния x_3^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели, которая описывает нелинейный объект в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

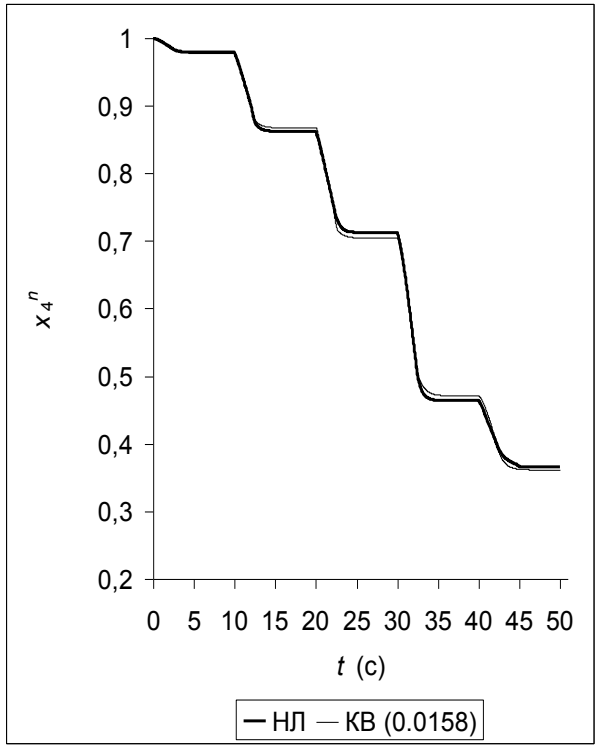


Рисунок 8. Переходные процессы нормированной переменной состояния x_4^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели, которая описывает нелинейный объект в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

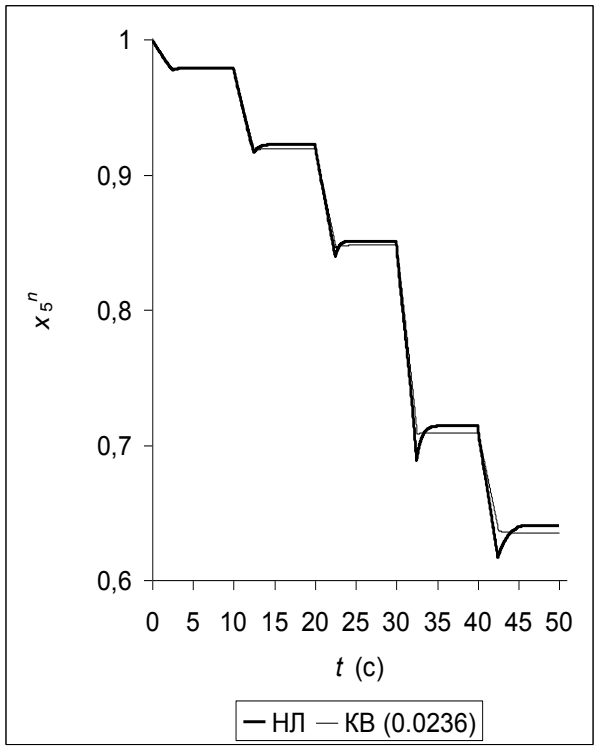


Рисунок 9. Переходные процессы нормированной переменной состояния x_5^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели, которая описывает нелинейный объект в окрестностях пяти соседних установившихся режимов.

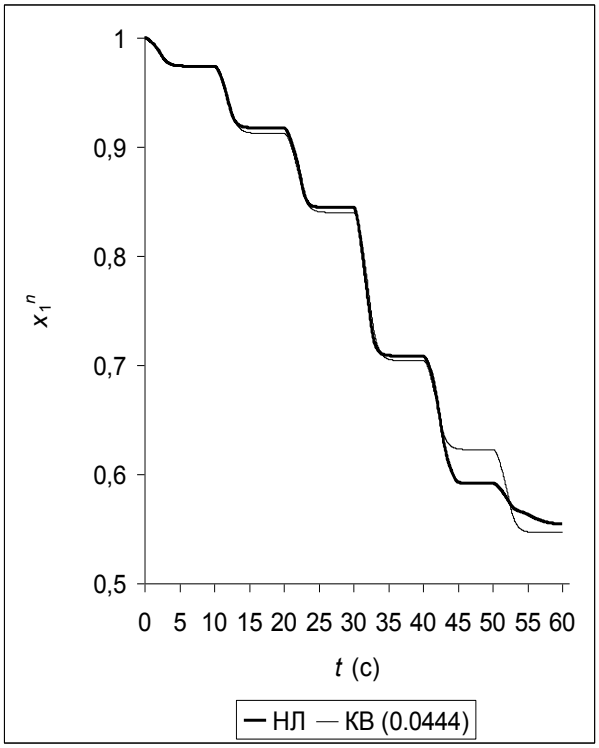


Рисунок 10. Переходные процессы нормированной переменной состояния x_1^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели, которая описывает нелинейный объект в окрестностях шести соседних установившихся режимов.

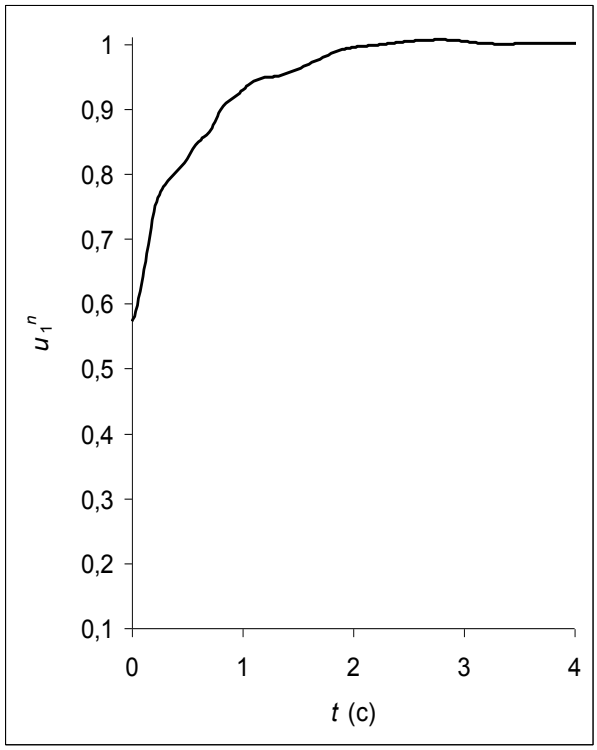


Рисунок 11. Переходный процесс нормированной переменной управления u_1^n *в замкнутой САУ.*

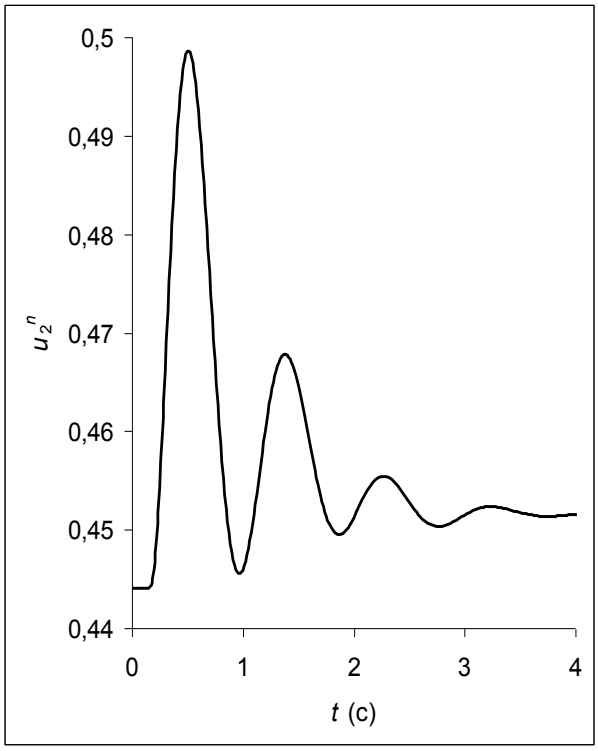


Рисунок 12. Переходный процесс нормированной переменной управления u_2^n *в замкнутой САУ.*

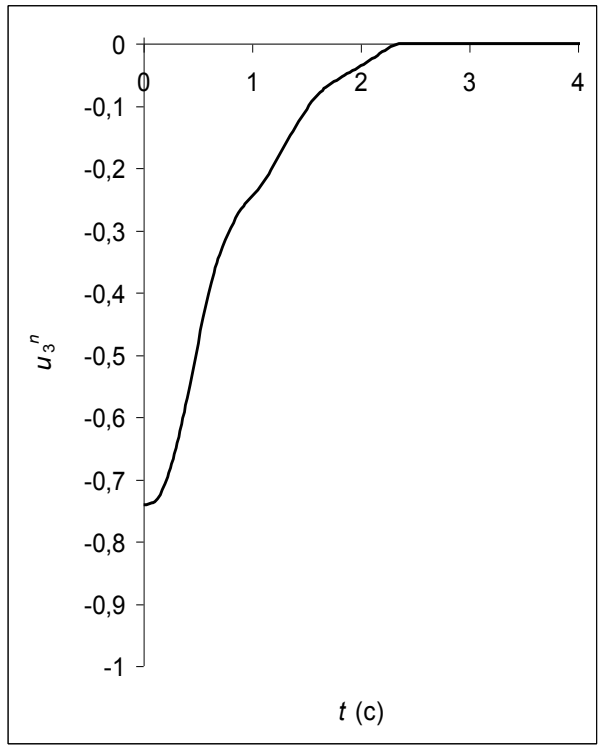


Рисунок 13. Переходный процесс нормированной переменной управления u_3^n *в замкнутой САУ.*

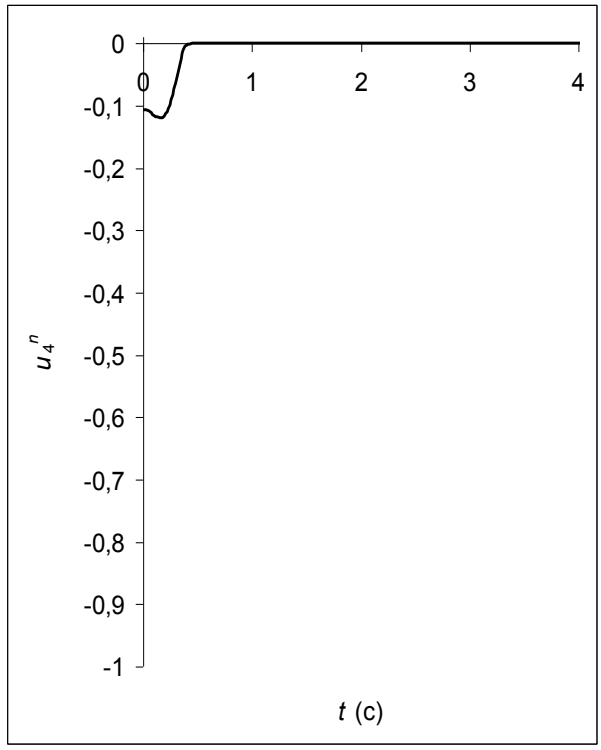


Рисунок 14. Переходный процесс нормированной переменной управления u_4^n *в замкнутой САУ.*

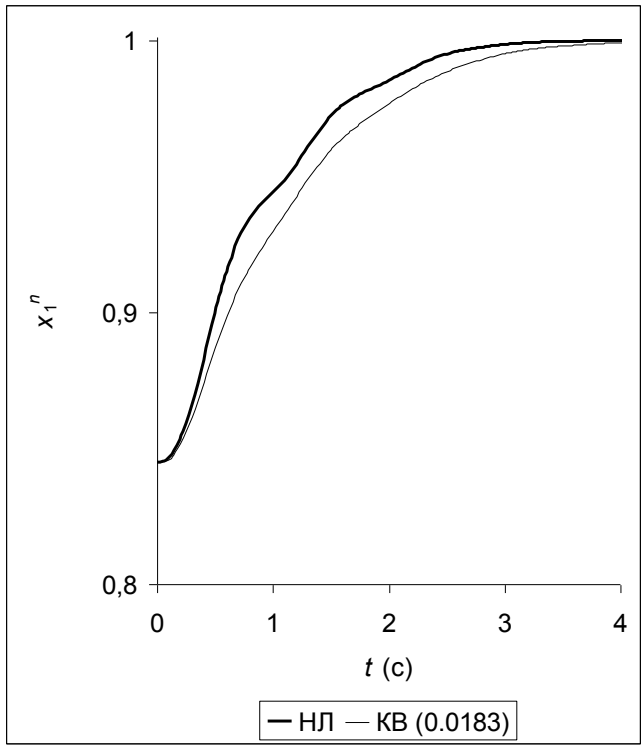


Рисунок 15. Переходные процессы нормированной переменной состояния x_1^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели в окрестностях трех соседних установившихся режимов в замкнутой САУ.

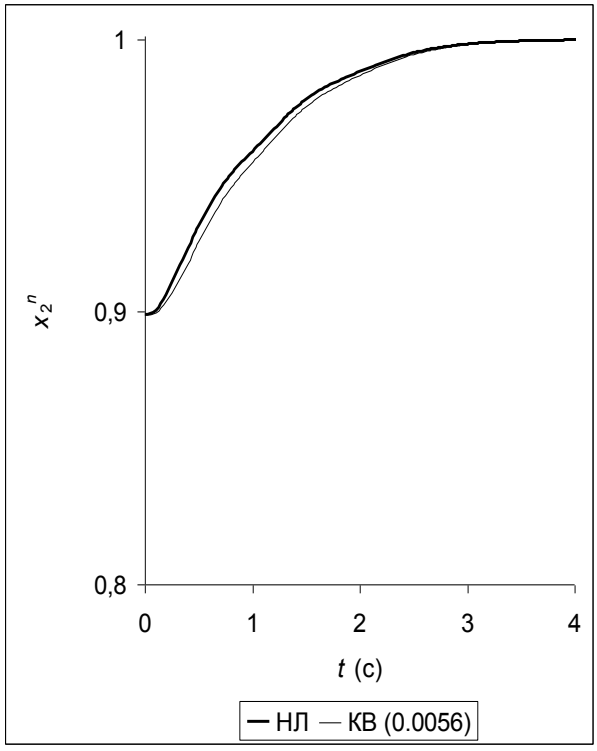


Рисунок 16. Переходные процессы нормированной переменной состояния x_2^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели в окрестностях трех соседних установившихся режимов в замкнутой САУ.

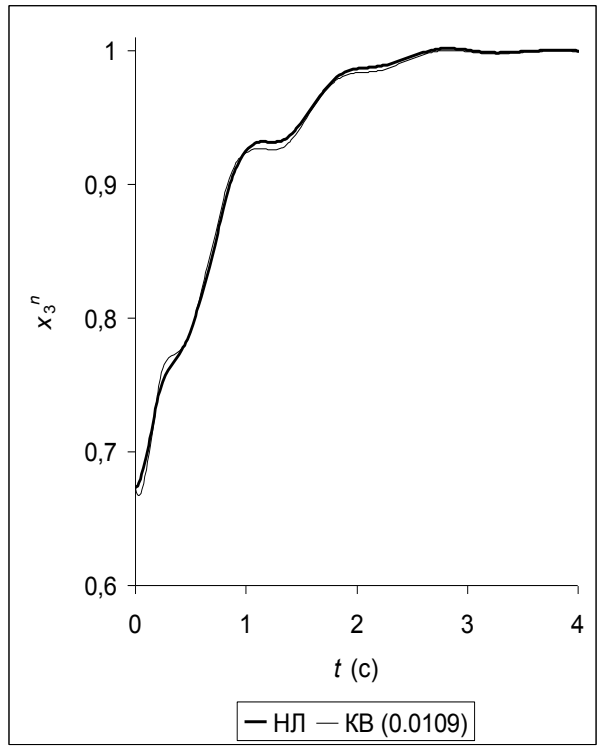


Рисунок 17. Переходные процессы нормированной переменной состояния x_3^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели в окрестностях трех соседних установившихся режимов в замкнутой САУ.

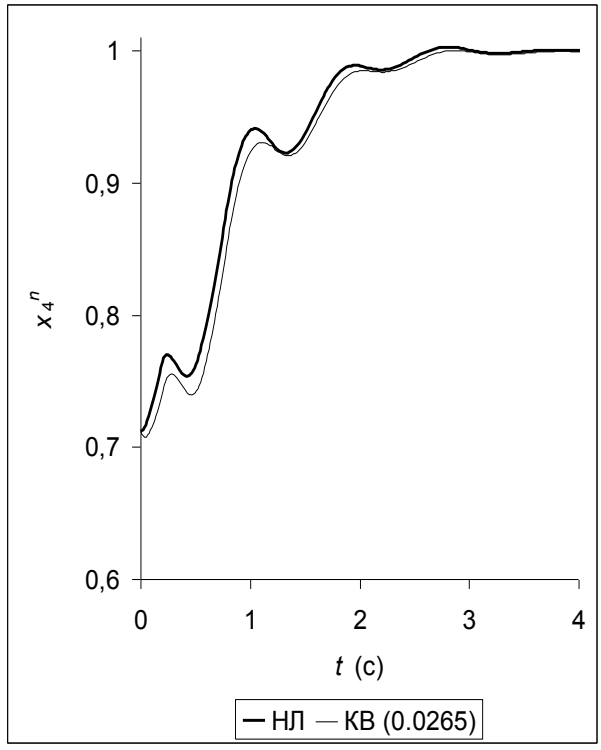


Рисунок 18. Переходные процессы нормированной переменной состояния x_4^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели в окрестностях трех соседних установившихся режимов в замкнутой САУ.

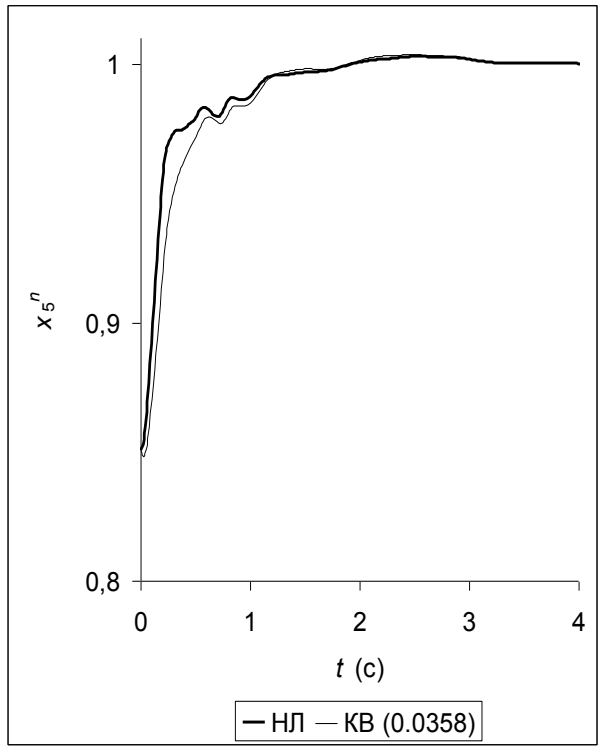


Рисунок 19. Переходные процессы нормированной переменной состояния x_5^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели в окрестностях трех соседних установившихся режимов в замкнутой САУ.

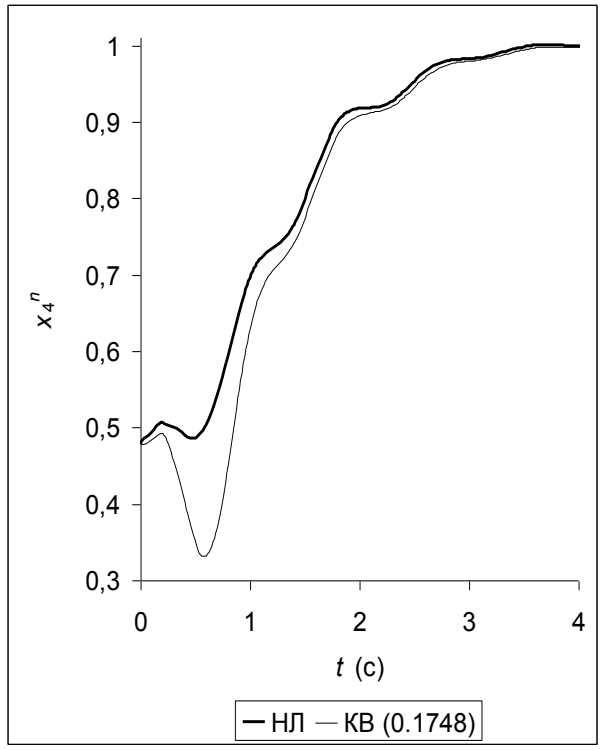


Рисунок 20. Переходные процессы нормированной переменной состояния x_4^n нелинейной (НЛ) модели и квадратичной (КВ) модели в окрестностях четырех соседних установившихся режимов в замкнутой САУ.

DOI:10.22337/1524-5845-2016-12-3-58-72

О ЯВЛЕНИИ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОДОЛЬНО СЖАТОЙ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ. ЧАСТЬ 1: О ПОСЛЕКРИТИЧЕСКОМ РАВНОВЕСИИ ОБОЛОЧКИ

Г.А. Мануйлов, С.Б. Косицын, М.М. Бегичев
Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II (МГУПС (МИИТ)), г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: Для круговой упругой кинематически продольно сжатой цилиндрической оболочки на основе анализа данных экспериментов рассматриваются особенности формирования начального послекритического равновесия, образования и развития ромбо-треугольных вмятин в процессе хлопка по нагрузке, а также характерные свойства кусочно-гладких кривых послехлопковых равновесий. Дано определение нагрузки резкого уменьшения энергетического барьера – максвелловой силы и описаны способы ее вычисления. Численные результаты сравниваются с экспериментальными.

Ключевые слова: потеря устойчивости, цилиндрическая оболочка, послекритическое равновесие

ON INSTABILITY OF CIRCULAR AXIALLY COMPRESSED CYLINDRICAL SHELL. PART 1: ON POSTBUCKLING EQUILIBRIUM OF THE SHELL

Gaik A. Manuylov, Sergey B. Kosytsyn, Maxim M. Begichev
Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, RUSSIA

Abstract: On the formation features of the initial postbuckling equilibrium, development of diamond- triangular dents, characteristic properties of postbuckling equilibrium curves for circular elastic axially compressed cylindrical shell under kinematic loading. The definition of sharp decrease of energy barrier – Maxwellload is given with the methods of its calculation. The numerical results are compared with experimental.

Key words: buckling, cylindrical shell, postbuckling equilibrium

Данная работа состоит из двух частей. В части I рассматриваются особенности различных этапов явления потери устойчивости продольно сжатой круговой цилиндрической оболочки в упругой стадии в условиях кинематического нагружения. В целом это явление достаточно сложное. Наиболее характерные этапы показаны на рис. 1:

1. Докритическое продольное сжатие;
2. Потеря устойчивости этого равновесия и формирование начального послекритического равновесия;
3. Перестройка формы деформации оболочки в процессе хлопка;
4. Начальное послехлопковое равновесие.

В части II на основе современных представлений анализируются особенности изменения энергетического барьера оболочки по мере роста сжимающей нагрузки. В настоящее время установлено, что резкое ступенчатое уменьшение этого барьера происходит при переходе через некоторую промежуточную нагрузку – так называемую «максвеллову силу», расположенную между верхней и нижней критическими нагрузками. Возможно, что в недалеком будущем именно на эту нагрузку «перепада» энергетического барьера смогут ориентироваться проектировщики.

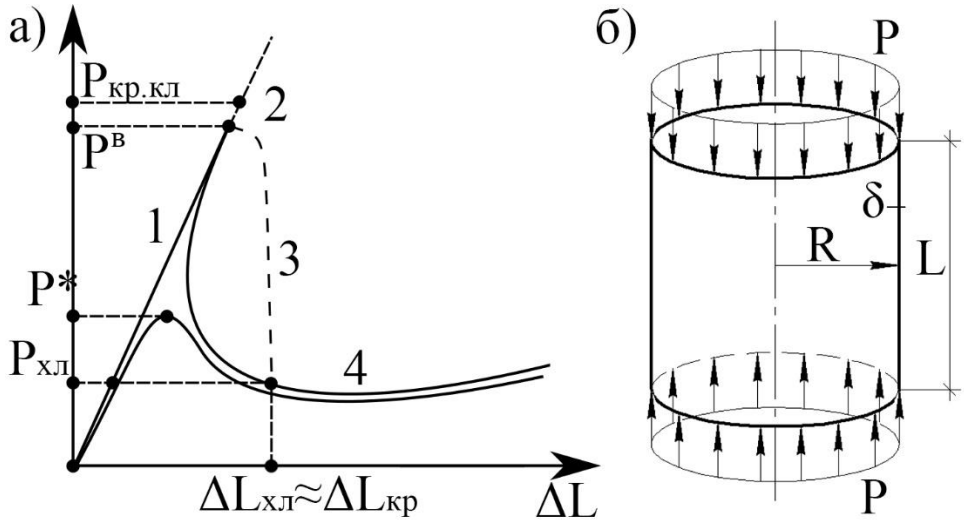


Рисунок 1. Потеря устойчивости продольно сжатой (кинематически) круговой цилиндрической оболочки: а) условная характеристика; б) схема оболочки и ее нагружения.

Задача устойчивости изотропной упругой продольно сжатой круговой цилиндрической оболочки – классическая задача теории устойчивости.

100 лет интенсивных исследований этой задачи не дали ответа на главный вопрос – какую безопасную, и в то же время не слишком «малую» нагрузку продольного сжатия можно назначать при проектировании?

Цель настоящей работы – попытка проанализировать главные особенности потери устойчивости продольно сжатой цилиндрической оболочки, а также исследовать величину нагрузки перепада энергетического барьера исходного равновесия. Это позволит с большим обоснованием назначать максимально безопасную сжимающую нагрузку для таких оболочек.

1. НЕУСТОЙЧИВЫЕ РАВНОВЕСИЯ НА УСЛОВНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

Испытания оболочки на устойчивость при продольном сжатии как правило проводятся в условиях кинематического нагружения. По результатам испытаний строится характеристика оболочки (рис. 1), но эта характеристика в значительной мере условная, поскольку криволинейная ее часть 2-4 на самом деле есть огибающая целой серии кривых неустойчивых равновесий с различным числом поперечных и продольных волн; начальный послехлопковый участок характеризуется серией устойчивых и разрывных кривых (рис. 2).

Участок неустойчивых равновесий условной характеристики (рис. 1) строится в виде кривой, проведенной через все крайние левые точки каждой вычисленной n, m – кривой (n и m – число окружных волн и продольных полуволн, соответственно).

Чем меньше n и m, тем меньше энергия упругой деформации оболочки в закритическом равновесии и тем ниже по нагрузке может опуститься данная кривая в условиях кинематического нагружения. На рис. 2 показана серия кривых неустойчивых равновесий, построенных Р. Джонсом [1] для бесконечно длинной оболочки, имеющей такое же соотношение R/δ=787, как и оболочка конечных размеров, испытанная Р. Тилеманном и М. Эсслингер [2]. Начиная вычисления с формы равновесия, имеющей 35 поперечных волн, Р. Джонс дошел до нижнего участка характеристики, определяемого кривыми равновесий с 8-ю и 9-ю поперечными волнами.

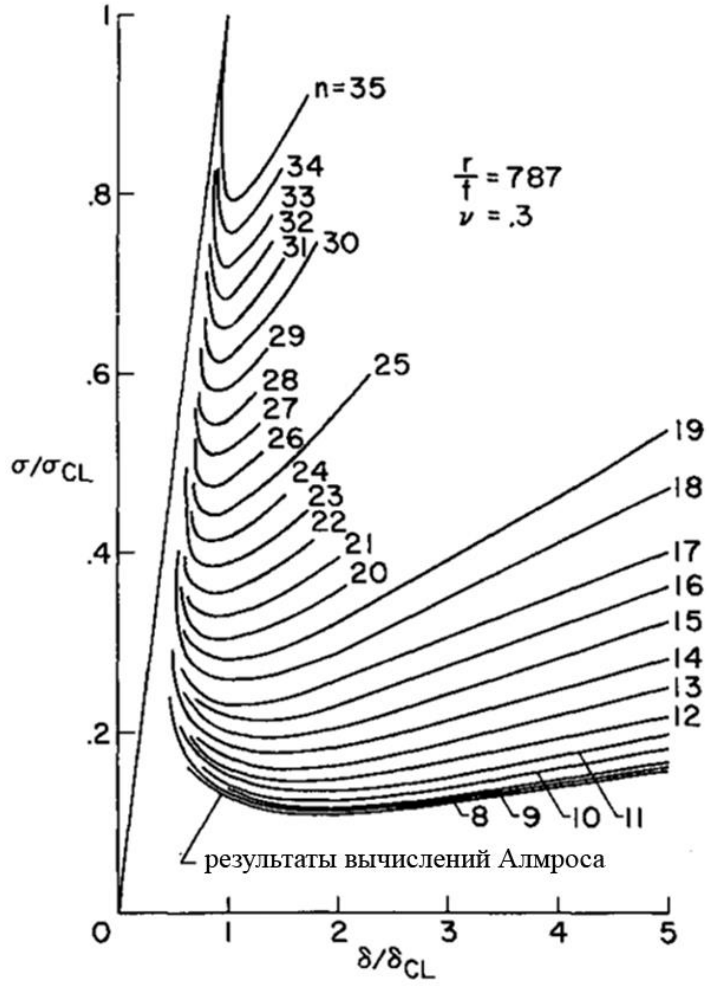


Рисунок 2. Серия кривых неустойчивых равновесий, полученных Р. Джонсом.

Эти кривые были близки к результатам В. Алмроса [3] и к экспериментальной кривой В. Тилеманна и М. Эсслингер [2], которая описывает равновесие с 10-ю окружными волнами. Если соединить все левые точки кривых Р. Джонса на рис. 2, то получим «неустойчивый» участок характеристики для этой оболочки.

2. ФОРМИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО ПОСЛЕКРИТИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ

В экспериментах явление бифуркационной потери устойчивости продольно сжатой цилиндрической оболочки не может быть реализовано. Влияние различных несовершенств и возмущающих воздействий приводит к тому, что оболочка теряет устойчивость равновесия осесимметричного сжатия не в точке бифуркации, а в предельной точке при нагрузках, меньших бифуркационной. В условиях тщательного изготовления и точнейшей отладки экспериментальной установки в ряде испытаний удавалось достичь критических значений нагрузки, весьма близких к классической бифуркационной (Л.Р. Исправников 1954г. [4], $0{,}75P_{кр\ кл}$, дюраль $R/\delta=188$; Р. Теннисон 1962 г. [5,6], $0{,}93P_{кр\ кл}$, майлар, $R/\delta=153$; А.В. Погорелов 1964 г. [7], $0{,}9P_{кр\ кл}$, медные образцы, напыление в вакууме на полированный цилиндр, $R/\delta=666$; Н. Ямаки и сотрудники 1975 г. [9], $(0{,}78\text{-}0{,}86)P_{кркл}$, майлар, $R/\delta=405$),

$$P_{кр.кл} = 2\pi E\delta^2 \Big/ \sqrt{1(1-\nu^2)}\,.$$

В отношении бифуркационной нагрузки есть основания считать, что эта наименьшая критическая нагрузка $P_{кркл}$, а также все высшие критические нагрузки: $P_{кр\ 2}$, $P_{кр\ 3}$, …, $P_{крs}$ – попарно двукратные

$$P_{кр\ 1} = P_{кр\ 2},\ P_{кр\ 3} = P_{кр\ 4},\ \ldots,\ P_{крs-1} = P_{крs}.$$

Каждой двукратной критической нагрузке соответствуют две взаимно ортогональные «нулевые» собственные формы потери устойчивости вида:

$$W_i = f_1 \sin\frac{\pi m x}{L}\sin\frac{ny}{R} \quad \text{и} \quad W_{i+1} = f_2 \sin\frac{\pi m x}{L}\cos\frac{ny}{R}.$$

Фактически это две одинаковые собственные формы, но «повернутые» одна относительно другой на 90°.

Дискретизация континуальной оболочки при численном решении расщепляет двукратные критические нагрузки на «попарно близкие» и простые:

$$\min P_{кр} = \tilde{P}_{кр1} < \tilde{P}_{кр2} < \tilde{P}_{кр3} < \ldots < \tilde{P}_{крs}.$$

При этом собственные формы практически не меняются. В случае простых критических нагрузок начальное послекритическое равновесие есть сумма предкритического равновесия W_0 и «нулевой» собственной формы потери устойчивости [9, 10] $\vec{W}_1^{\,0} \quad i = 1,2,\ldots,s$.

$$W_{начпослекр} = W_0 + \varepsilon\vec{W}_1^{\,0} \qquad (1)$$

Это соотношение справедливо и для высших начальных послекритических равновесий

$$W_{i\ начпослекр} = W_0(\tilde{P}_{кр\,i}) + \varepsilon\vec{W}_i^{\,0} \quad i = 2,3,\ldots,s$$

Все начальные послекритические равновесия порождают серию «падающих» кривых неустойчивых равновесий, формирующих участок 2-4 характеристики оболочки.

Отметим, что формула (1) есть следствие из ассимптотического разложения [11, 12] для послекритического равновесия при очень малых ε ($\varepsilon^2 << \varepsilon$).

$$W_{послекр} = W_0 + \varepsilon\vec{W}_1^{\,0} + \varepsilon^2 W_2 + \varepsilon^3 W_3 + \ldots$$

Для начального послекритического равновесия $\varepsilon^2 << \varepsilon$, что позволяет в этом разложении ограничиться первым членом [10].«Нулевая» собственная форма потери устойчивости оболочки $\vec{W}_1^{\,0}$ – собственный вектор производной нелинейного оператора (матрицы Якоби) $J(\tilde{P}_{кр\,1})$, соответствующая нулевому собственному значению этой матрицы при $P = \tilde{P}_{кр1}$.

$$\lambda_i^J(\tilde{P}_{кр\,i}) = 0; \quad J(\tilde{P}_{кр\,i})\cdot\vec{W}_i^{\,0} = 0; \quad i = 1,2,\ldots$$

Обращение минимального собственного значения $\lambda_1^J(\tilde{P}_{кр1})$ в ноль означает, что по направлению перемещений, задаваемых нулевым собственным вектором $\vec{W}_i^{\,0}$ в критическом состоянии жесткость оболочки равна нулю, потенциальная яма «уплостилась», исходное равновесие перестало быть асимптотически устойчивым и оболочка может перейти в новое начальное послекритическое равновесие. Эти соображения дают механическое истолкование формулы (1).

Напомним, что для центрально сжатого эйлерового стержня при сколь угодно малом превышении эйлеровой нагрузки, форма начального послекритического равновесия определяется «нулевой» собственной формой (синусоидой), которая суммируется с прямолинейным предкритическим равновесием. Для цилиндрической оболочки (L=2R, R/δ=250) соответствующий результат суммирования предкритического осесимметричного равновесия и первой нулевой собственной формы показан на рис. 3.



Рисунок 3. Формирование начального послекритического равновесия продольно сжатой цилиндрической оболочки.

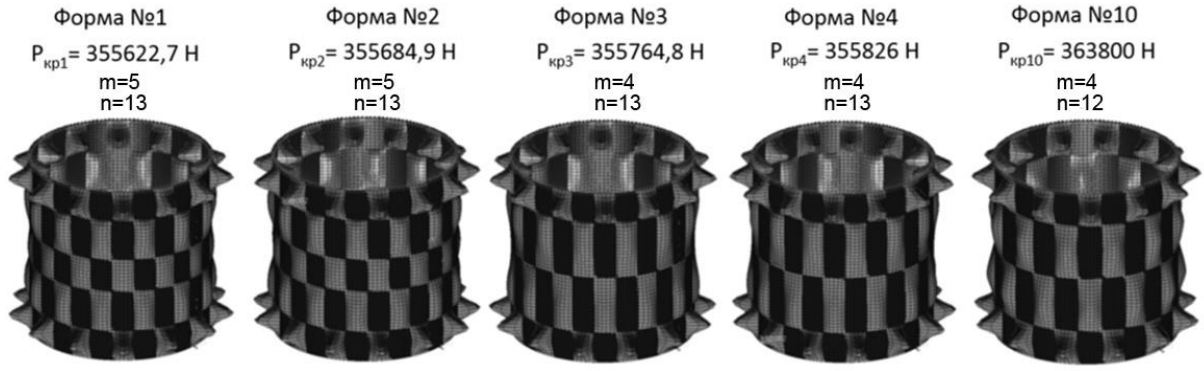


Рисунок 4. Предкритические собственные формы потери устойчивости круговой продольно сжатой цилиндрической оболочки, вычисленные при нагрузке 340 кН ($P_{кр.биф}$= 348,25 кН).

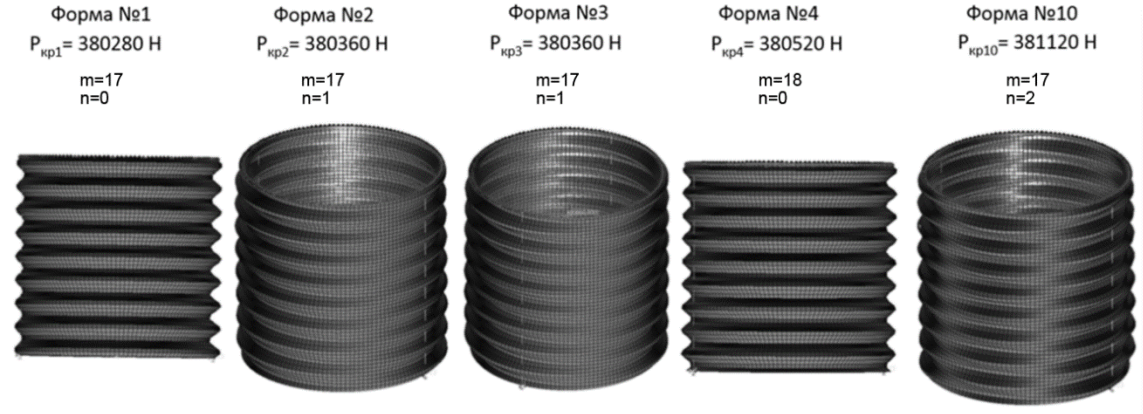


Рисунок 5. Собственные формы потери устойчивости круговой продольно сжатой цилиндрической оболочки, вычисленные при нулевой нагрузке (L=2R, R/δ=250).

Развитие нелинейного осесимметричного краевого эффекта в процессе нагружения оболочки, имеющей краевые опорные закрепления, приводит к тому, что собственные формы потери устойчивости, вычисленные для предкритического равновесия (рис. 4) резко отличаются от аналогичных собственных форм, вычисленных при нулевой нагрузке (рис. 5). Так для шарнирноопертой оболочки, имеющей R/δ=250, L=2R, $E=2{,}1*10^6$ кг/см^2, ν=0,3 первые 10 критических нагрузок, вычисленных для ненагруженной оболочки (опция buckling в комплексе NASTRAN) отличаются между собой пос-

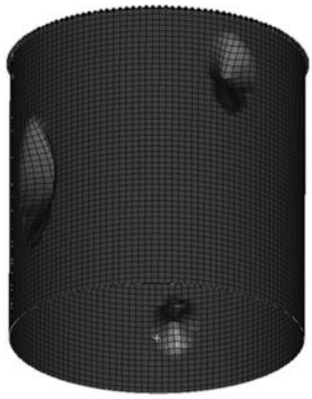


Рисунок. 6. Несовершенная цилиндрическая оболочка с тремя вмятинами.

ле третьего знака. Они соответствуют как осесимметричным, так и неосесимметричным формам потери устойчивости оболочки.
Сравнение предкритических собственных форм потери устойчивости оболочки (рис. 4) с аналогичными формами, вычисленными при нулевой нагрузке (рис. 5), показывает, что среди первых нет осесимметричных форм и нет несимметричных форм с малым количеством окружных волн. Резко отличаются сравниваемые формы и по числу продольных полуволн m (для предкритических форм оно значительно меньше).
Отметим, что приведенные результаты получены численно. Реальная оболочка всегда теряет устойчивость в предельной точке при нагрузке P*. В этом случае начальное послекритическое равновесие всегда простое (исключая случай «ветвления в вершине холма»). Оно формируется согласно (1) со своим «нулевым» собственным вектором $\vec{W}_i^0(P^*)$.
Известно [10, 13], что для точки бифуркации справедливо условие ортогональности: работа внешних сил $\vec{P}$ на перемещениях $\vec{W}_i^0(P_{биф})$ равна нулю:

$$\left(P_{биф}\cdot\vec{W}_i^0(P_{биф})\right)=0 \qquad (2)$$

Это энергетический признак того, что критическая точка есть точка бифуркации. При невыполнении условия (2):

$$\left(\vec{P}^*\cdot\vec{W}_i^0(P^*)\right)\neq 0$$

критическая точка есть предельная точка.
Но для предельной точки форма нулевого собственного вектора сильно зависит от близости критической нагрузки в предельной точке к бифуркационной нагрузке «совершенной» оболочки.
Для рассмотренной выше, но несовершенной оболочки (3 вмятины одинаковой глубины, разбросанные по поверхности оболочки, рис. 6) в случае малой глубины этих вмятин (≈0,05δ) нулевая собственная форма еще напоминает соответствующую бифуркационную форму потери устойчивости. Поэтому и начальное равновесие после прохождения предельной точки оказывается «похожим» на начальные послебифуркационные равновесия оболочки без несовершенств (рис. 7).
Отметим, что здесь отношение критической нагрузки в предельной точке $P_{кр}$=336 кН к бифуркационной $P_{нел}$=348 кН было близко к единице (≈0,965).Когда же несовершенства относительно велики (в данном случае если глубина вмятин порядка толщины оболочки), то собственная форма потери устойчивости во многих случаях практически повторяет форму предкритического равновесия (рис. 8). В этом случае начальное послекритическое равновесие оказывается почти пропорциональным предкритическому равновесию. При этом отношение $P^*/P_{кр}$=219/348=0,63 – достаточно далеко от единицы.

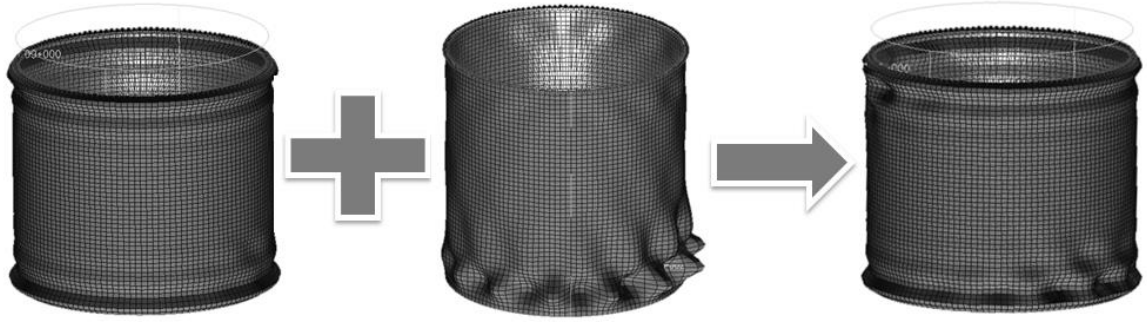


Рисунок. 7. Формирование начального послекритического равновесия круговой продольно сжатой цилиндрической оболочки с малыми начальными несовершенствами $P^*/P_{кр}=0{,}965$.

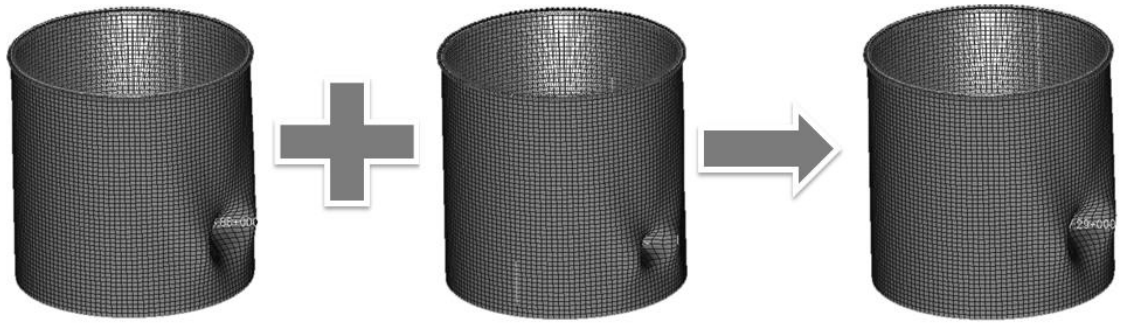


Рисунок. 8. Формирование начального послекритического равновесия круговой продольно сжатой цилиндрической оболочки с большими начальными несовершенствами $P^*/P_{кр}=0{,}63$.

Выше отмечалось, что если предельная точка близка к точке бифуркации, то «нулевой» собственный вектор будет «похож» на аналогичный вектор в точке бифуркации. Соответственно будут похожими и начальные послекритические равновесия. Именно это позволило Л.Р. Исправникову (1954 г.) экспериментально наблюдать в точке начального послекритического равновесия (перед хлопком!) при $P^*\approx 0{,}75P_{кр.кл}$ еле заметные, но правильно расположенные квадратные волны на поверхности оболочки [4] (рис. 9).

Эта форма равновесия получалась согласно (1) как сумма предкритического осесимметричного равновесия и «нулевой» собственной формы, близкой к одной из нулевых собственных форм в точке бифуркации.

$$\vec{W}_1^{\,0} = f_1 \cos\frac{\pi m x}{L} \sin\frac{ny}{R}$$

Соответствующая точка выделена на графике на рис. 9.

Фактически наблюдения Л.Р. Исправникова подтверждают справедливость формулы (1). Подчеркнем, что именно квадратные (или почти квадратные) вмятины и выпучины образуют поверхность оболочки вблизи точки бифуркации в начальном послекритическом равновесии до хлопка по нагрузке. Среди первых собственных форм потери устойчивости нет форм с ромбическими вмятинами. К тому же ромбические вмятины до хлопка «не нужны», как это выяснится в дальнейшем. Другое подтверждение формулы (1) дает скоростная киносъемка процесса хлопка, выполненная Р. Теннисоном (1962 г.). На рис. 10 показаны последовательные этапы перехода от квадратной вмятины (кадры 1 и 2 – до хлопка, кадр 3 – начало хлопка) к вмятине ромбической формы (кадр 11 – конец хлопка).

Наконец, фотографии, полученные в экспериментах С. Кинемитсу и Н. Ноиджимы (NASA, 1939 г.) показывают, что начальная послекритическая форма неустойчивого рав-

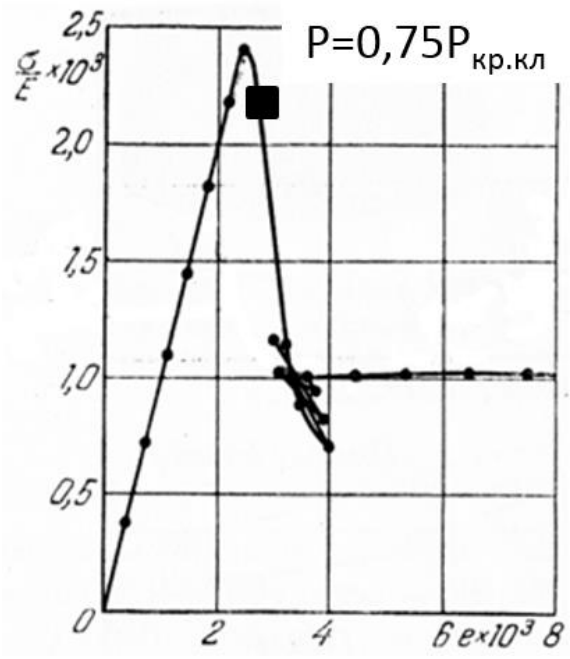


Рисунок 9. Кривая из экспериментального испытания оболочек Л.Р. Исправникова.



Рисунок 10. Последовательность формирования ромбической вмятины, согласно киносъемке Р. Теннисон 1962 г.

новесия оболочки имела квадратные вмятины. Эти вмятины выглядели, как вытянутые «наклонные» эллипсы, вписанные в контур квадрата с большой осью, совпадающей с диагональю квадрата и расположенной под углом ≈45° к образующей (кадры 2 и 3 на рис. 11).

3. ХЛОПОК ПО НАГРУЗКЕ. САМООРГАНИЗАЦИЯ ОБОЛОЧКИ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВМЯТИН

Наблюдаемый при кинематическом нагружении «хлопок по нагрузке» из начального послекритического равновесия оболочка совершает при условии сохранения неизменной величины деформации общего укорочения длины оболочки, достигнутой при критической нагрузке центрального сжатия

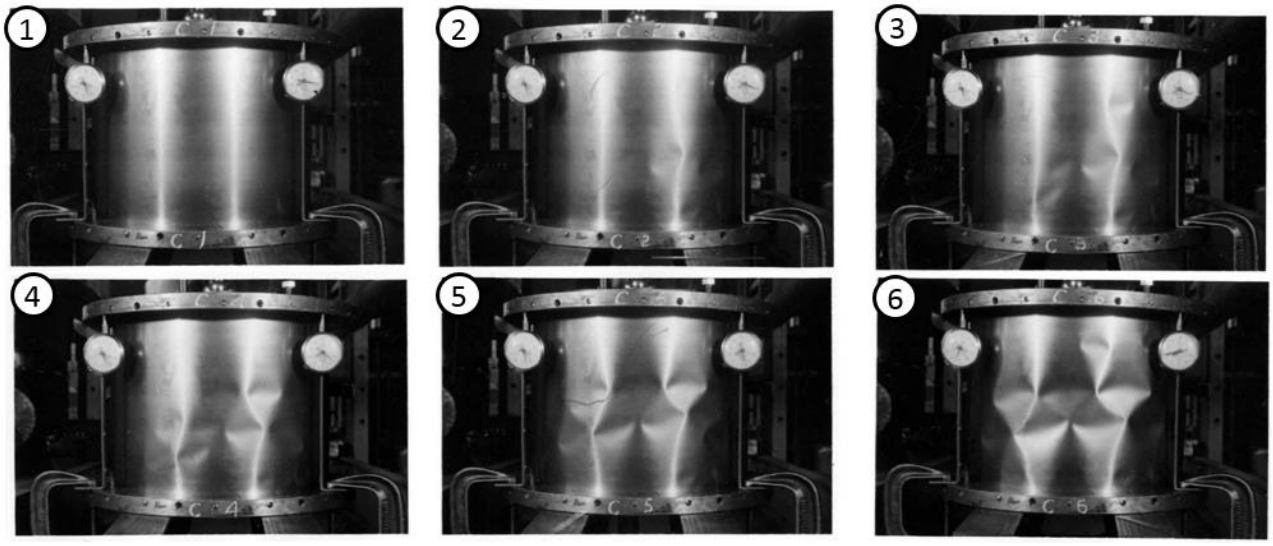


Рисунок 11. Формирование ромбических вмятин в эксперименте С. Кинемитсу и Н. Ноиджима.

$\Delta(L)_{кр}$. Критическая нагрузка $P_{кр}$ мгновенно падает до значения $P_{хл} \approx (0{,}2 - 0{,}3)\ P_{кр}$. Но поскольку

$$\Delta(L)_{хл} = \Delta(L)_{кр} = P_{кр} \cdot L/(E \cdot A),$$

а нагрузка

$$P_{хл} < P_{кр},$$

то для выполнения условий указанного равенства критического обжатия оболочки и послехлопкового ее укорочения при значительно меньшей нагрузке необходимо, чтобы это послехлопковое укорочение частично обеспечивалось продольным сжатием оболочки «остаточной» силой $P_{хл}$, и частично за счет разности между длиной, образующей L и проекцией на ось оболочки этой же образующей, испытывающей деформацию изгиба (функция прогибов $w(x)$) в состоянии послехлопкового равновесия (рис. 11):

$$\Delta(L)_{хл} = \Delta L(P_{хл})_{сж} + \Delta L(P_{хл})_{изг} = \\ = \frac{P_{хл} L}{EA} + 0{,}5 \int \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx$$

При этом для относительно коротких оболочек форма изгибного послехлопкового равновесия определяется характерными овально – ромбовидными вмятинами, распределенными по всей поверхности оболочки.

У более длинных оболочек после хлопка образуется пояс изгибных деформаций вдоль окружности, который состоит из двух –трех рядов таких вмятин.

Геометрию формирования послехлопковых ромбовидных вмятин, которые переводят цилиндрическую поверхность оболочки в изометрическую поверхность правильной складки, имеющей ромбически – треугольные грани с разделяющими их ломаными ребрами первым описал в 1955г японский ученый Ю. Иошимура (рисунок 12, [15]). В его честь в литературе ромбовидные вмятины называют вмятинами Иошимуры.

Однако сам Иошимура считал, что строго треугольно-ромбические вмятины с плоскими гранями, как результат выпучивания продольно сжатой оболочки, могут появиться только при условии, что толщина поверхности оболочки есть исчезающее малая величина (рис. 13, а).

В 2006 г. Ю. Хорак вместе с соавторами [16] строго доказал существование устойчивого решения уравнений Кармана-Доннела в виде трубчатой складки при исчезающее малой толщине оболочки ($\delta/R \to 0$).

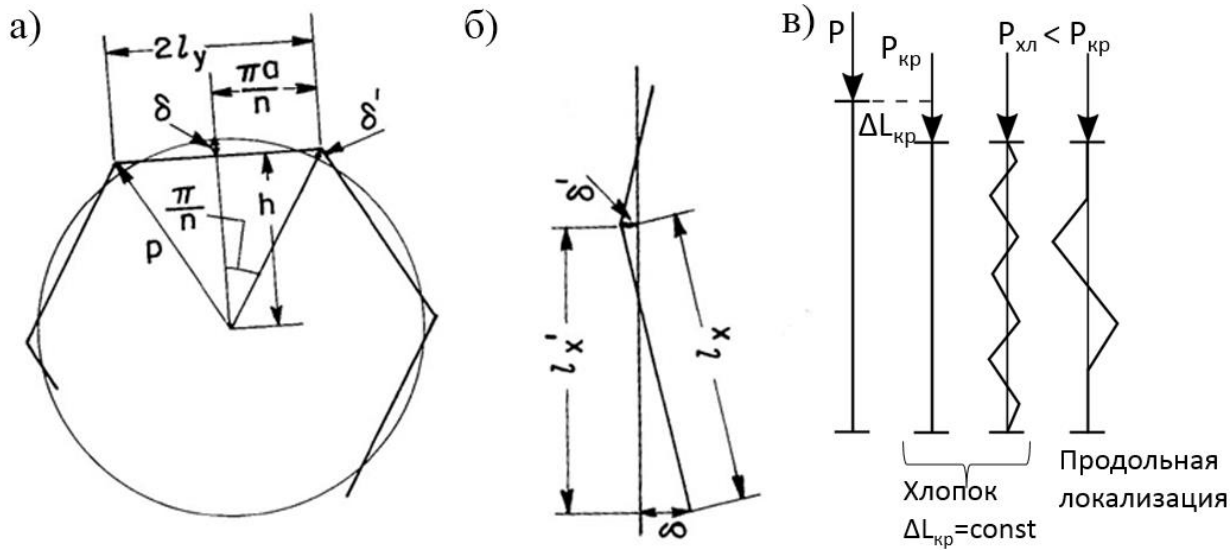


Рисунок 12. Геометрия образования вмятин и уменьшение проекции образующей оболочки после хлопка.

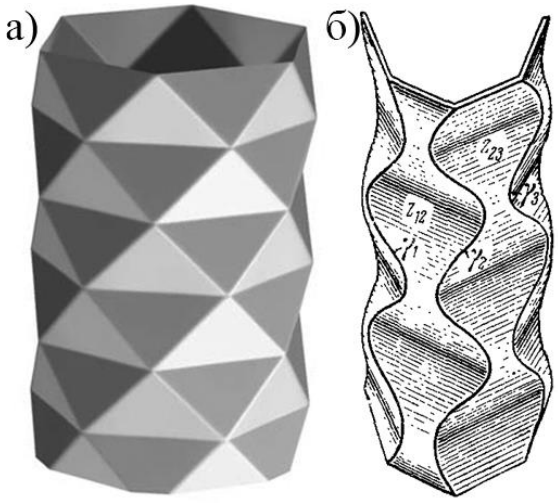


Рисунок 13. Изометричная цилиндру развертывающаяся поверхность по А.В. Погорелову.

Возможность реализации послехлопковой формы равновесия оболочки в виде «волнистой трубки», «склеенной» из кусков развертывающихся поверхностей была предсказана А.В. Погореловым (рис. 13, б) [6] на основе геометрических представлений.

Откуда появляются ромбо-треугольные вмятины в процессе «хлопка» по нагрузке? Ответ заключается в следующем: форма и расположение первоначальных квадратных (или «слабо прямоугольных») вмятин типа складки препятствует образованию трубчатой поверхности, почти изометричной цилиндрической поверхности и способной деформироваться под действием относительно малой сжимающей нагрузки без качественного изменения структуры вмятин. Поэтому первоначальные квадратные вмятины в процессе хлопка постепенно поворачиваются на 45°, объединяются, укрупняются и даже смещаются по поверхности оболочки. Увидеть последовательно этапы перехода квадратных вмятин в ромбо-треугольные удалось уже упоминавшимся японским исследователям С. Кинемитсу и Н. Ноиджиме [14]. Они реализовали с помощью механического пресса очень медленное кинематическое нагружение нескольких тонкостенных стальных обо-

лочек (R/δ=1875 и 1250). Наблюдения показали начальное «складывание» квадратных вмятин относительно наклонной диагонали квадрата и образование наклонных эллипсовидных вмятин с большой осью по этой диагонали. При последующем нагружении эти вмятины постепенно поворачивались до совпадения упомянутой оси с горизонтальною. Получались известные ромбо-треугольные вмятины, которые, однако, покрывали не всю боковую поверхность оболочки, а образовывали в средней части поле из трех рядов вмятин. Затем в конце хлопка этот пояс перестроился в 2-хрядный с одновременным укрупнением размеров и уменьшением количества вмятин вдоль окружности (n=10, рис. 11).

Перестройка поля распределенных почти равномерно вмятин в 2-х или 3-хрядный пояс – характерное явление в экспериментах со сжатыми цилиндрическими оболочками [17]. Описанный процесс перестройки формы вмятин есть процесс «самоорганизации» сильно нелинейной системы, какой является сжатая и неустойчивая цилиндрическая оболочка в условиях хлопка по нагрузке и «необходимости» сохранения критического продольного укорочения.

Наиболее известное явление самоорганизации нелинейной системы – перестройка нагреваемого снизу слоя жидкости, когда при сверхкритическом перепаде температур по толщине происходит самоорганизация сплошного слоя в дискретную структуру с шестигранными ячейками (ячейки Беннара). Самоорганизация позволяет реализовать новый процесс передачи тепла – процесс конвективного теплообмена вместо первоначального процесса теплопроводности.

Конечное распределение ромбо-треугольных вмятин в виде трех- или двухрядного пояса в средней по высоте части оболочки – это другое проявление самоорганизации – продольная локализация. По существу явление локализации – это вторичная потеря устойчивости первичной закритической регулярной и неустойчивой формы равновесия в сильно нелинейных и достаточно протяженных системах.

Известные примеры локализации – образование большой уединенной волны в океане, выбросы ж.д. пути после потери устойчивости в результате нагрева, перестройка регулярного закритического равновесия при потере устойчивости упругопластической многопролетной балки и т.д. [18]. Иногда продольная локализация вмятин заканчивается в виде трехрядного пояса послехлопковых вмятин (А.В. Погорелов, рис. 14, а). Однако чаще финальное равновесие после хлопка имеет двухрядный пояс вмятин (Л.Р. Исправников, R/δ=188, рис. 14, б; С. Кинемитсу и Н.Ноиджима [14], рис. 11). Вычисления послехлопкового равновесия модельной оболочки (L/R=4, R/δ=250, E=10^5 МПа, ν=0,3) в комплексе NASTRAN показало, что после хлопка образуется трехрядный пояс из 8-ми ромбо-треугольных вмятин, который после вторичного хлопка перестраивается в двухрядный пояс с 7-ю вмятинами (рис. 15, а, б).

4. ПОСЛЕХЛОПКОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ И СНЕЙК-РЕШЕНИЯ

После хлопка по нагрузке при дальнейшем кинематическом нагружении оболочка проходит через ряд устойчивых равновесий скачкообразно (по нагрузке), переходя из одного в другое в точках пересечения (вторичные неустойчивые бифуркации) равновесных ветвей с числом вмятин n и n-1.

На рис. 16, а показаны результаты экспериментального исследования послехлопковых равновесий оболочки из майлара, выполненные В. Тилеманном и М. Эсслингер [2]. При достижении верхней критической нагрузки $P_{кр}$=0,63P оболочка прощелкнула при сохранении величины критического укорочения в устойчивое равновесие с 14-ю поперечными вмятинами при нагрузке $P_{хл}$=0,2$P_{кр.кл}$.

Далее после незначительного укорочения наблюдался «малый» хлопок по нагрузке вниз в равновесие с 13-ю поперечными волнами.

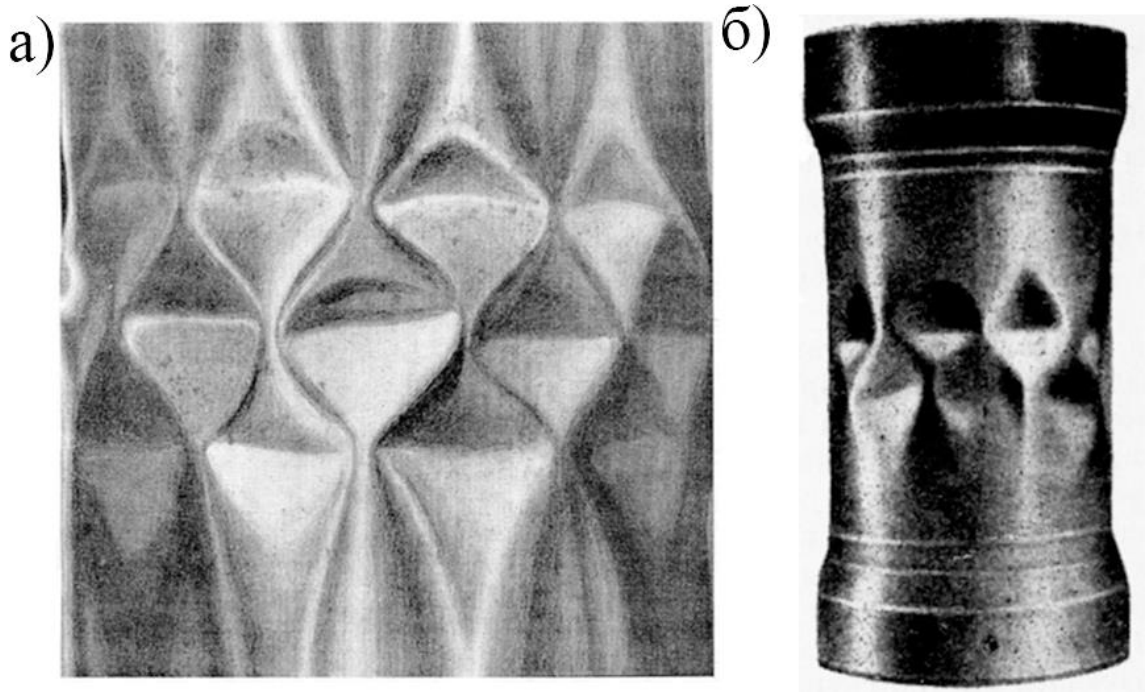


Рисунок 14. Финальное равновесие после хлопка: а) результат эксперимента А.В. Погорелова; б) Результат эксперимента Л.Р. Исправникова.

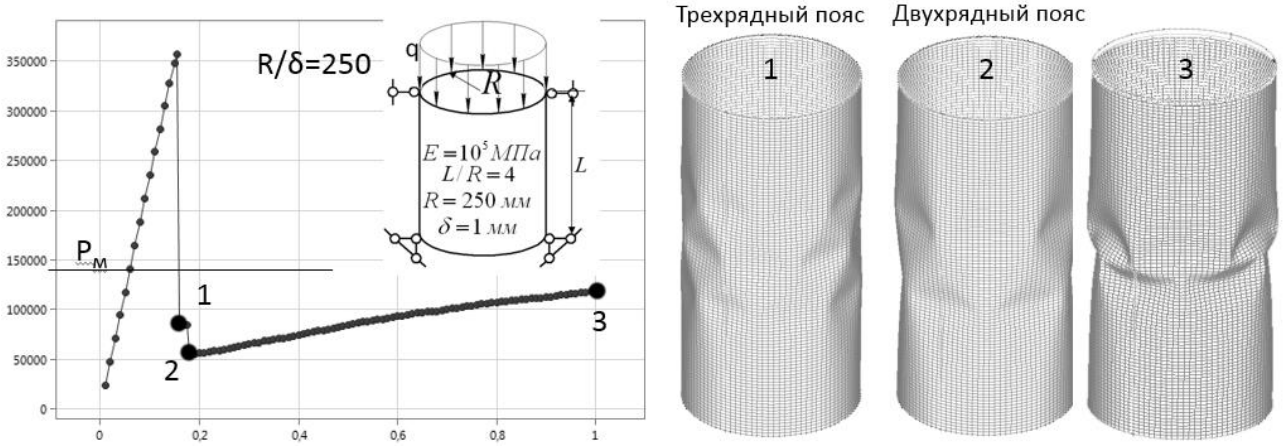


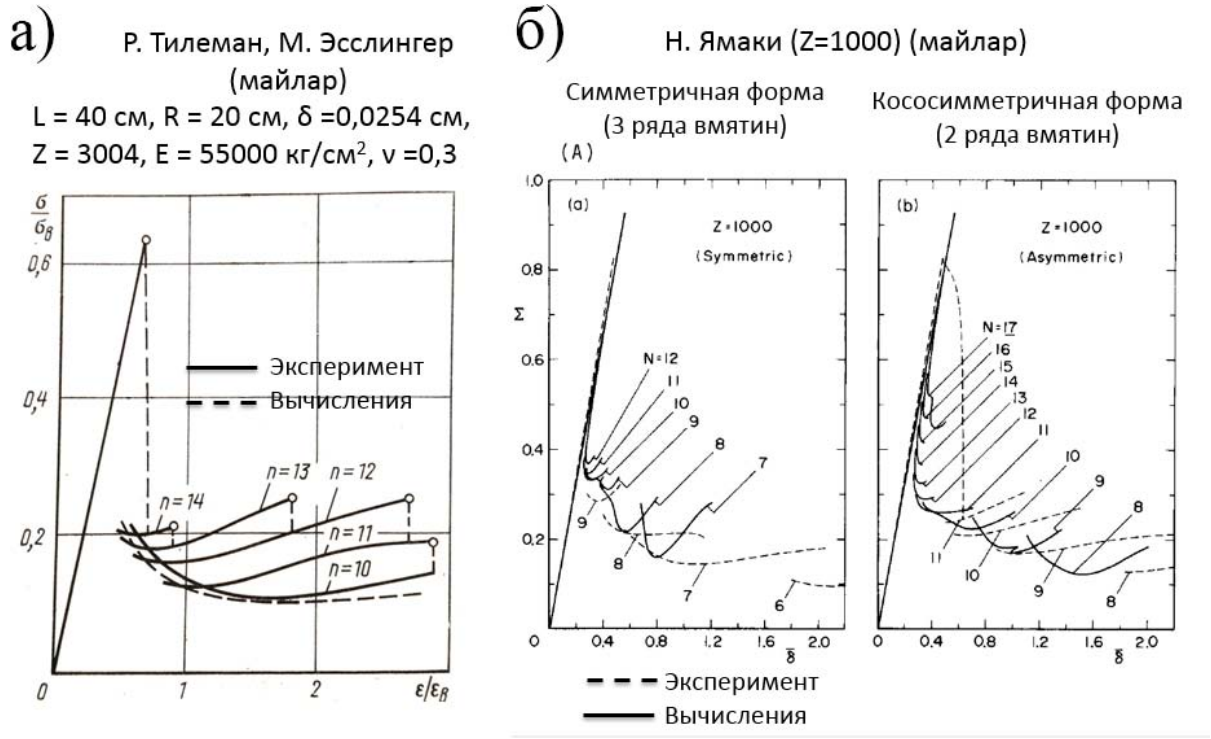
Рисунок 15. Исследование перестройки равновесий после хлопка на модельной оболочке.

Это равновесие развивалось вплоть до точки бифуркации при некотором росте нагрузки до $\approx 0{,}25P_{кр.кл}$ и достигнутом укорочении в два раза большем укорочения в предыдущей точке бифуркации. Скачек вниз по нагрузке привел оболочку в равновесие с 12-ю поперечными вмятинами. Аналогичным образом в эксперименте были последовательно достигнуты равновесия с 11-ю, а затем и с 10-ю поперечными вмятинами. Нижняя точка последней кривой могла быть принята за нижнюю критическую нагрузку и почти совпадала с результатами вычислений В. Алмроса (об этом говорилось ранее).

На рис. 16, б приведены экспериментальные и численные результаты исследования закритических и послехлопковых равновесий оболочки из майлара с параметром

$$Z = L^2\sqrt{1-\nu^2}\,/R\delta = 1000\ ,$$

выполненной группой исследователей во главе с Н. Ямаки [8].



<u>Рисунок 16.</u> Численные и экспериментальные исследования послехлопковых равновесий: а) результаты Р. Тилеманна и М. Эсслингер; б) результаты Н. Ямаки.

Здесь пунктиром показаны экспериментальные кривые, а сплошными – численные результаты. Характер развития экспериментальных послехлопковых равновесий (как для случая «симметричного» трехрядного пояса, так и при развитии кососимметричного двухрядного пояса) очень близок к рассмотренному выше послехлопковому поведению оболочки В. Тилемана и М. Эсслингер. Те же устойчивые ветви равновесий с n окружными волнами, которые в точках бифуркаций обрываются, и оболочка скачком переходит в более низкое по нагрузке равновесие с n-1 окружной волной. Количество окружных вмятин было равно n=9, 8, 7 и 6 в симметричном случае и n=11, 10, 9 и 8 в кососимметричном варианте распределения вмятин. Но здесь обращает на себя внимание резкое расхождение (в обеих вариантах) экспериментальных и численных кривых равновесий при больших послехлопковых деформациях и перемещениях. Это объясняется тем, что слабонелинейные уравнения Кармана-Доннела, построенные на геометрических предпосылках пологих оболочек, не могут правильно описывать сильно деформированные послехлопковые равновесия цилиндрической оболочки. Ранее на этот «недостаток» уравнений Кармана-Доннела для описания послехлопковых равновесий указывали Р. Теннисон [19], а также Ю. Хорак и его соавторы [20].

Отметим также, что послехлопковые равновесия (в зоне больших укорочений) для металлических оболочек сопровождаются развитием сильных пластических деформаций, фактически означающих разрушение оболочки. Для оболочек, сделанных из майлара (или из других эластомеров), достаточно хорошо выдерживающих значительные деформации в упругой стадии работы материала, некоторый интерес представляют неустойчивые послебифуркационные ветви равновесий. Каждая такая ветвь с n-1 окружными вмятинами должна проходить под устойчивой ветвью с n окружными волнами (влево от точки вторичной бифуркации в сторону уменьшения укорочений). Но в эксперимен-

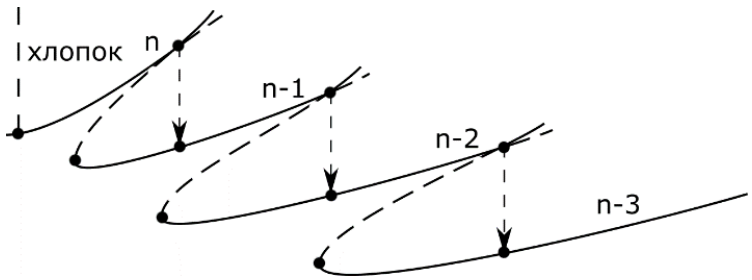


Рисунок 17. «Снейк-решения» – послехлопковые ветви равновесий.

те обнаружить неустойчивые закритические ветви равновесий пока не представляется возможным. Вопрос заключается в том, действительно ли эти n-1 ветви равновесий становятся ветвями устойчивых равновесий после перехода через «левую» предельную точку (рис. 17).

Подобные змеевидные кривые равновесий называют «снейк-решениями» [21]. Эти снейк-решения уравнений Кармана-Доннела были численно построены [22] и использованы при достаточно спорной на наш взгляд попытке определить так называемую «максвеллову силу» (продольную сжимающую нагрузку), превышение которой резко снижает уровень минимального энергетического барьера исходного равновесия. Соответствующие вопросы рассмотрены в части II настоящей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jones R.M.** Toward a New Snap-Through Buckling Criterion for Axially Compressed Circular Cylindrical Shells. // AIAA Journal Vol. 4, No. 9, pp. 1526-1530.
2. **Thielemann W.F., Esslinger M.E.** Post-buckling equilibrium and stability of thin walled circularcylinders under axial compression. // Theory of Thin Shells, Editor, F. I. Niordson, Springer-Verlag, 1969.
3. **Almroth B.O.** Influence of imperfections and edge restraint on the bucklingof axially compressed cylinders. // 7th Structures and Materials Conference.
4. **Исправников Л.Р.** Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрической оболочки при осевом сжатии, кручении и поперечном давлении. // Труды краснознаменной ордена Ленина Военно-воздушной инженерной академии им. профессора Н.Е. Жуковского; Вып 535. Под. Ред. А.С. Вольмира. – М.: Академия, 1955. – 38с.
5. **Tennyson R.C.** A Note on the Classical Buckling Load of Circular Cylindrical Shells Under Axial Compression. // AIAA Journal, Volume 1, No. 9, pp. 2194-2196
6. **Tennyson R.C.** BucklingModesofCircularCylindrical Shells UnderAxial Compression. // AIAA J.,7 (8), pp. 1481-1487
7. **Погорелов А.В.** Цилиндрические оболочки при закритических деформациях. I. Осевое сжатие. – Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1962. – 52 с.
8. **Yamaki N.** Elastic stability of circular cylindrical shells. // Volume 27 of Applied Mathematics and Mechanics. Elsevier, Amsterdam, Netherlands. – 1984.
9. **Мануйлов Г.А., Бегичев М.М.** О механизме потери устойчивости круговой продольно сжатой цилиндрической оболочки. // Труды семинара «Современные проблемы механики, энергоэффективность сооружений и ресурсосберегающие технологии» г. Москва, РУДН 15 – 17 сентября 2015 г. – М.: РУДН, 2015, с. 82-92
10. **Мануйлов Г.А., Косицын С.Б., Бегичев М.М.** О критических и послекритических равновесиях в задачах устойчивости упругих систем. // Строительная

механика инженерных конструкций и сооружений, №5, 2015, с. 47-54.
11. **Koiter W.T.** On the Stability of Elastic Equilibrium. // NASA Technical Translation F-10, 833, Clearinghouse, US Dept. of Commerce/Nat. Bur. of Standards N67–25033, 1967
12. **Budiansky B.** Dynamic buckling of elastic structures: criteria and estimates. / B. Budiansky. // Dynamic stability of structures, edited by G. Hermann, Pergamon, Oxford, 1967, pp. 83-106.
13. **Мануйлов Г.А., Жуков К.А., Косицын С.Б.** Метод «неособенных продолжений» в задачах устойчивости нелинейно деформируемых упругих систем. // Строительная механика и расчет сооружений, №5, 1989, с. 68-72
14. **Kanemitsu S, Nojima N.** Axial compression test of thin circular cylinders. A. Length effect. B. Visual study of buckling.Master's thesis, California Institute of Technology. 1939
15. **Yoshimura Y.** On The Mechanism Of Buckling Of A Circular Cylindrical Shell Under Axial Compression. // NACA-TM-1390, July 1955.
16. **Horak J., Lord G.J., Peletier M.A.** Cylinder buckling: the mountain pass as an organizing centre. // SIAM J. Appl. Math. 66, 2006, pp. 1793-1824.
17. **Esslinger M., Geier B.** Calculated postbuckling loads as lower limits for the buckling loads of thin-walled circular cylinders. // Buckling of structures – Proceedings of the Symposium, Cambridge, Mass, 1974, pp. 274-290.
18. **Твергард В., Ниделман А.** О явлении локализации при выпучивании. // Потеря устойчивости и выпучивание конструкций. Теория и практика. Под ред. Дж. М. Томпсона и Дж. У. Ханта. – М.: Наука, 1991, с 11-24.
19. **Tennyson R.C.** Buckling modes of circular cylindrical shells under axial compression. // AIAA Journal 7:8, 1969, pp. 1481-1487.
20. **Horak J., Lord G.J., Peletier M.A.** Cylinder buckling: the mountain pass as an organizing centre. // SIAM J. Appl. Math. 66, 2006, pp. 1793-1824.
21. **Thompson J.M.T.** Advances in shell buckling: theory and experiments. // Int. J. Bifurcation and Chaos, 2015.
22. **Thompson J.M.T., Van der Heijden G.H.M.** Quantified "shock-sensitivity" above the Maxwell load. // Int. J. Bifurcation and Chaos, 24 (3), 2014.
23. **Hunt G.W.** Reflections and symmetries in space and time. // IMA Journal of Applied Mathematics, 2011, 76, pp. 2-26.

Мануйлов Гайк Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительная механика» Московского государственного университетапутей сообщения Императора Николая II (МГУПС (МИИТ)); 127994, г. Москва, ул. Образцова, 15; тел./факс +7(499) 972-49-81

Косицын Сергей Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика» Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (МГУПС (МИИТ)); 127994, г. Москва, ул. Образцова, 15; тел./факс +7(499) 978-16-73;
E-mail: kositsyn-s@yandex.ru, kositsyn-s@mail.ru

Бегичев Максим Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика» Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II (МГУПС (МИИТ)); 127994, г. Москва, ул. Образцова, 15; тел./факс +7(499) 978-16-73; E-mail: noxonius@mail.ru

Gaik A. Manuylov, Ph.D., Associate Professor, Department of Structural Mechanics, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT); 127994, Russia, Moscow, 9b9 Obrazcova Street; phone/fax +7(499)972-49-81.

Sergey B. Kosytsyn, Dr.Sc., Professor, Head of Department of Theoretical Mechanics, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT); 127994, Russia, Moscow, 9b9 Obrazcova Street; phone/fax: +7(499) 978-16-73; E-mail: kositsyn-s@yandex.ru, kositsyn-s@mail.ru

Maxim M. Begichev, Ph.D., Associate Professor, Department of Theoretical Mechanics, Moscow State University of Railway Engineering (MIIT); 127994, Russia, Moscow, 9b9 Obrazcova Street; phone/fax: +7(499) 978-16-73; E-mail: noxonius@mail.ru.

DOI:10.22337/1524-5845-2016-12-3-73-83

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УПРУГИХ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В КУРПСАЙСКОЙ ПЛОТИНЕ С ОСНОВАНИЕМ (ПОЛУПЛОСКОСТЬ)

В.К. Мусаев
Российский университет дружбы народов, г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: Рассматриваются некоторые вопросы численного моделирования Курпсайской бетонной плотины с грунтовым основанием при волновых воздействиях. На основе метода конечных элементов в перемещениях разработаны алгоритм и комплекс программ для решения линейных плоских двумерных задач волновой теории упругости. Проведено сопоставление с результатами смешанного метода конечных элементов. Максимальное растягивающее напряжение возникает в верхней части задней области контура плотины. Упругое контурное напряжение на гранях плотины является почти зеркальным отражением одна другой, то есть антисимметричным.

Ключевые слова: математическое моделирование, контурные напряжения, Курпсайская бетонная плотина, волновая теория сейсмостойкости, динамическая теория упругости, перемещение, скорость перемещений, ускорение, сейсмическое воздействие, функция Хевисайда, метод конечных элементов, комплекс программ, узловые точки, явная двухслойная схема

MATHEMATICAL MODELING OF SEISMIC NONSTATIONARY ELASTIC WAVES STRESSES IN KURPSAI DAM WITH A BASE (HALF-PLANE)

Vyacheslav K. Musayev
Russian University of friendship of peoples, Moscow, RUSSIA

Abstract: the paper Considers some issues of numerical simulation Kurpsai concrete dam with a ground base under wave influences. On the basis of finite elements method in the movements of the algorithm and program complex for solving linear flat two-dimensional problems of the wave theory of elasticity. A comparison with the results of the mixed finite element method. The maximum tensile stress occurs in the upper part of the back area around the dam. Elastic loop voltage on the faces of the dam is almost a mirror reflection of one another, that is, by the antisymmetric.

Key words: mathematical modeling, grid voltages, Kurpsai concrete dam, the wave theory of seismic stability, dynamic theory of elasticity, displacement, velocity, displacement, acceleration, seismic impact Heaviside function, the finite element method, complex programs, anchor points, an explicit two-layer scheme

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЛНОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Импульсное воздействие характеризуется внезапностью приложения и кратковременностью действия, измеряемого микросекундами. Интенсивность их достаточно велика, для того чтобы произвести разрушение и большие необратимые изменения в теле, на которые они действуют.

В деформируемом теле при импульсном воздействии возникают возмущения различной природы. Они распространятся с конечными

скоростями. Величина возмущений зависит от состояния тела и характера деформаций, в виде волн возмущений, называемых волнами напряжений.

Возмущения, распространяясь в теле, образуют области, которые расширяются с течением времени и ограничены частью поверхности тела и поверхностью фронта волны напряжений.

Каждой области возмущений соответствует свое напряженно-деформированное состояние, характеризуемое тензором напряжений и тензором деформаций. Области возмущений можно разделить на первичные и вторичные. Первичной является область возмущений волны нагрузки. Области возмущений волн разгрузки и отраженных будут вторичными. Они всегда находятся внутри области возмущений волны нагрузки и являются областями с начальными напряжениями и деформациями.

Волны напряжений различной природы, распространяясь, в деформируемом теле взаимодействуют, друг с другом, что приводит к образованию новых областей возмущений, перераспределению напряжений и деформаций. При интерференции волн напряжений их интенсивности складываются. Они могут достигать значений, превосходящих предел прочности материала. В этом случае наступает разрушение материала.

После трехкратного или четырехкратного прохождения и отражения волн напряжений в теле процесс распространения возмущений становится установившимся, напряжения и деформации усредняются, тело находится в колебательном движении.

Некоторые вопросы в области постановки, разработки методики и алгоритма и результаты решенных нестационарных динамических задач рассмотрены в следующих работах [1–64].

Для решения задачи о моделировании упругих нестационарных волн напряжений в деформируемых областях сложной формы рассмотрим некоторое тело Γ в прямоугольной декартовой системе координат XOY (рис. 1), которому в начальный момент времени $t = 0$ сообщается механическое нестационарное импульсное воздействие.

Предположим, что тело Γ изготовлено из однородного изотропного материала, подчиняющегося упругому закону Гука при малых упругих деформациях.

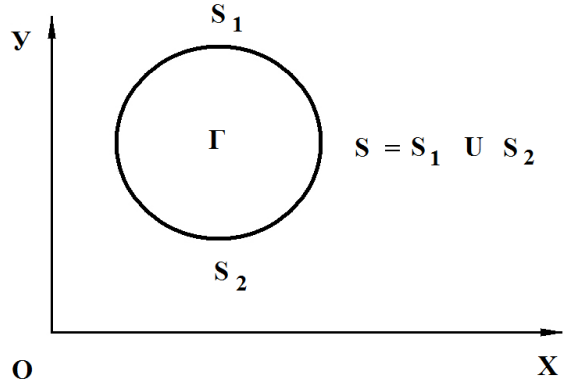


Рисунок 1. Некоторое тело Γ в прямоугольной декартовой системе координат XOY.

Точные уравнения двумерной (плоское напряженное состояние) динамической теории упругости имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial Y} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial Y} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \ (x,y) \in \Gamma,$$

$$\sigma_x = \rho C_p^2 \varepsilon_x + \rho (C_p^2 - 2C_s^2)\varepsilon_y,$$

$$\sigma_y = \rho C_p^2 \varepsilon_y + \rho (C_p^2 - 2C_s^2)\varepsilon_x,$$

$$\tau_{xy} = \rho C_s^2 \gamma_{xy},$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial X}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial Y},$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial Y} + \frac{\partial v}{\partial X}, \quad (x,y) \in (\Gamma \cup S), \quad (1)$$

где: σ_x, σ_y и τ_{xy} – компоненты тензора упругих напряжений; ε_x, ε_y и γ_{xy} – компоненты тензора упругих деформаций; u и v – составляющие вектора упругих пере-

мещений вдоль осей OX и OY соответственно; ρ – плотность материала;

$$C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$$

– скорость продольной упругой волны;

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

– скорость поперечной упругой волны; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; $S\ (S_1 \cup S_2)$ – граничный контур тела Γ.

Систему (1) в области, занимаемой телом Γ, следует интегрировать при начальных и граничных условиях.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМА

Для решения двумерной плоской динамической задачи теории упругости с начальными и граничными условиями (1) используем метод конечных элементов в перемещениях.

Задача решается методом сквозного счета, без выделения разрывов.

Основные соотношения метода конечных элементов получены с помощью принципа возможных перемещений.

Принимая во внимание определение матрицы жесткости, вектора инерции и вектора внешних сил для тела Γ, записываем приближенное значение уравнения движения в теории упругости

$$\overline{H}\ddot{\vec{\Phi}} + \overline{K}\vec{\Phi} = \vec{R},$$
$$\vec{\Phi}\big|_{t=0} = \vec{\Phi}_0, \quad \dot{\vec{\Phi}}\big|_{t=0} = \dot{\vec{\Phi}}_0, \qquad (2)$$

где: $\overline{H}$ – диагональная матрица инерции; $\overline{K}$ – матрица жесткости; $\vec{\Phi}$ – вектор узловых упругих перемещений; $\dot{\vec{\Phi}}$ – вектор узловых упругих скоростей перемещений; $\ddot{\vec{\Phi}}$ – вектор узловых упругих ускорений; $\vec{R}$ – вектор внешних узловых упругих сил.

Соотношение (2) система линейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка в перемещениях с начальными условиями.

Таким образом, с помощью метода конечных элементов в перемещениях, линейную задачу с начальными и граничными условиями (1) привели к линейной задаче Коши (2).

Определим упругое контурное напряжение на границе области, свободной от нагрузок.

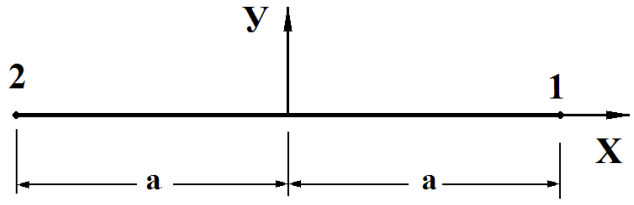


Рисунок 2. Контурный конечный элемент с двумя узловыми точками.

С помощью вырождения прямоугольного конечного элемента с четырьмя узловыми точками получим контурный конечный элемент с двумя узловыми точками (рис. 2).

При повороте оси x на угол α против часовой стрелки, получим упругое контурное напряжение σ_k в центре тяжести контурного конечного элемента с двумя узловыми точками

$$\sigma_k = (E/(2a(1-\nu^2)))((u_1 - u_2)\cos\alpha + (v_1 - v_2)\sin\alpha). \qquad (3)$$

Для интегрирования уравнения (2) конечно-элементным вариантом метода Галеркина приведем его к следующему виду

$$\overline{H}\frac{d}{dt}\dot{\vec{\Phi}} + \overline{K}\vec{\Phi} = \vec{R},\ \frac{d}{dt}\vec{\Phi} = \dot{\vec{\Phi}}. \qquad (4)$$

Интегрируя по временной координате соотношение (4) с помощью конечноэлементного варианта метода Галеркина, получим двумерную явную двухслойную конечноэлементную линейную схему в перемещениях для внутренних и граничных узловых точек

$$\vec{\dot{\Phi}}_{i+1} = \vec{\dot{\Phi}}_i + \Delta t \overline{H}^{-1}(-\overline{K}\vec{\Phi}_i + \vec{R}_i),$$
$$\vec{\Phi}_{i+1} = \vec{\Phi}_i + \Delta t \vec{\dot{\Phi}}_{i+1}. \qquad (5)$$

Основные соотношения метода конечных элементов в перемещениях получены с помощью принципа возможных перемещений и конечноэлементного варианта метода Галеркина.

Общая теория численных уравнений математической физики требует для этого наложение определенных условий на отношение шагов по временной координате Δt и по пространственным координатам, а именно

$$\Delta t = k \frac{min\, \Delta l_i}{C_p} \ (i = 1,\ 2,\ 3,...), \qquad (6)$$

где: Δl – длина стороны конечного элемента.

Результаты численного эксперимента показали, что при k = 0,5 обеспечивается устойчивость двумерной явной двухслойной конечноэлементной линейной схемы в перемещениях для внутренних и граничных узловых точек на квазирегулярных сетках.

Для исследуемой области, состоящей из материалов с разными физическими свойствами, выбирается минимальный шаг по временной координате (6).

На основе метода конечных элементов в перемещениях разработана методика, разработан алгоритм и составлен комплекс программ для решения двумерных волновых задач динамической теории упругости.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЛНОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КУРПСАЙСКОЙ ПЛОТИНЕ

Рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны на Курпсайскую плотину с основанием (рис. 3).

Начальные условия приняты нулевыми. В сечении на расстоянии 2,3H (рис. 3) (H = 115 м) при $0 \le n \le 25$ ($n = t/\Delta t$) скорости упругих перемещений $\dot{u}$ и $\dot{v}$ изменяются линейно от 0 до $\dot{u} = P\sin\alpha$ и $\dot{v} = P\cos\alpha$, а при n > 25 $\dot{u} = P\sin\alpha$ и $\dot{v} = P\cos\alpha$ ($P = \sigma_0/(\rho C_p)$, $\sigma_0 = 0{,}1$ МПа (1 кгс/см^2)).

Контур плотины *HIJABCDE* (кроме точки *D*) предполагается свободным от нагрузок при $t > 0$.

Граничные условия для контура *EFGH* при $t > 0$ $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$.

Отраженные волны от контура *EFGH* не доходят до исследуемых точек при $0 \le n \le 2000$.

Расчеты проведены при следующих исходных данных: H = 115 м; $\Delta t = 0{,}742 \cdot 10^{-3}$ с; E = $0{,}36 \cdot 10^4$ МПа ($0{,}36 \cdot 10^5$ кгс/см^2); ν = 0,36; ρ = $0{,}122 \cdot 10^4$ кг/м^3 ($0{,}122 \cdot 10^{-5}$ кгс с^2/см^4); C_ρ = 1841 м/с.

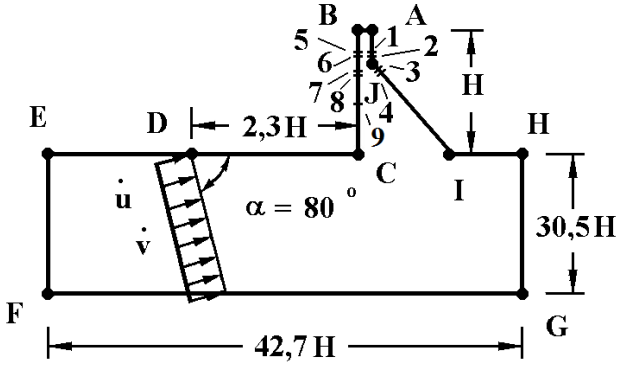


Рисунок 3. Постановка задачи для системы сооружение-основание (Курпсайская плотина).

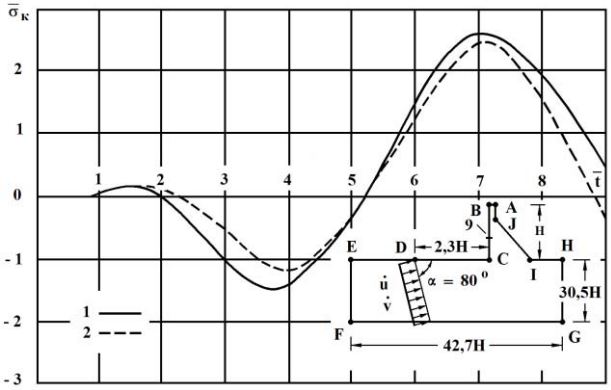


Рисунок 4. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 9 во времени $\bar{t}$ на контуре Курпсайской плотины при воздействии плоской продольной упругой волны типа полупериода синусоиды при $\lambda / H = 3$.

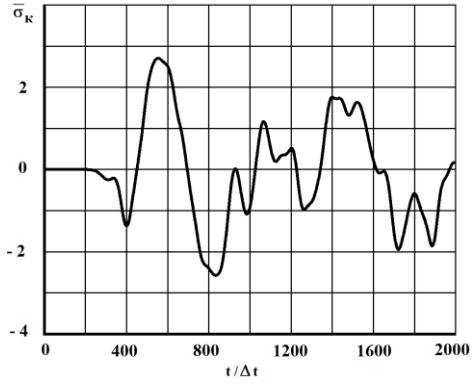


Рисунок 5. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 1 на контуре Курпсайской плотины во времени $t / \Delta t$.

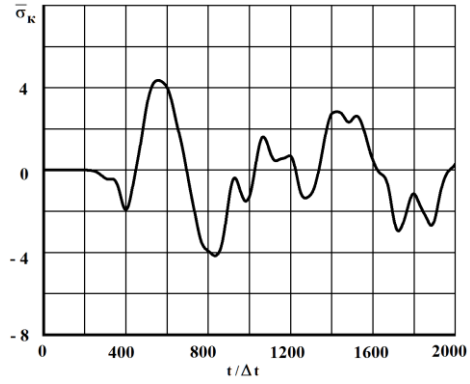


Рисунок 6. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 2 на контуре Курпсайской плотины во времени $t / \Delta t$.

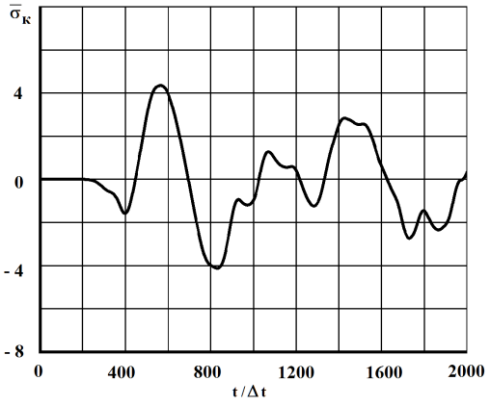


Рисунок 7. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 3 на контуре Курпсайской плотины во времени $t / \Delta t$.

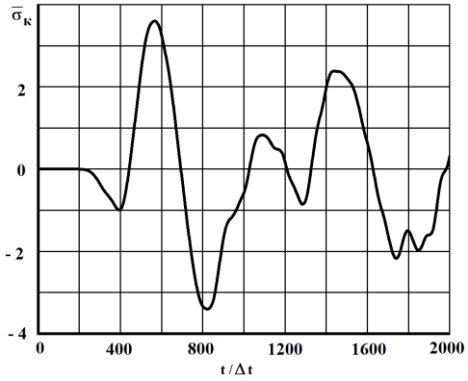


Рисунок 8. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 4 на контуре Курпсайской плотины во времени $t / \Delta t$.

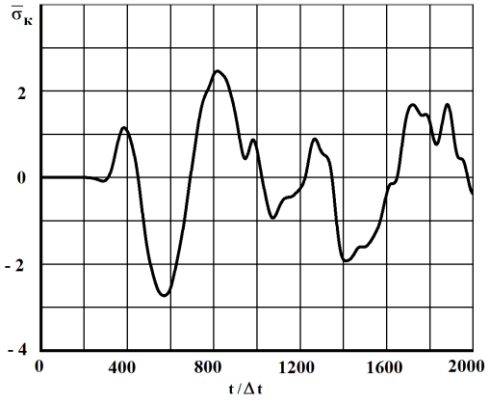


Рисунок 9. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 5 на контуре Курпсайской плотины во времени $t / \Delta t$.

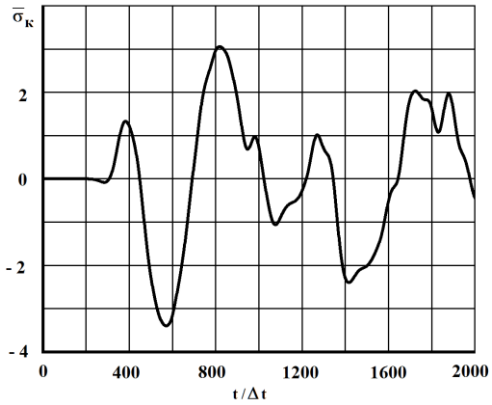


Рисунок 10. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 6 на контуре Курпсайской плотины во времени $t/\Delta t$.

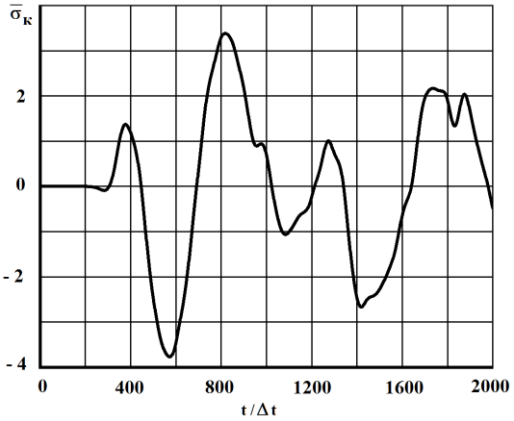


Рисунок 11. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 7 на контуре Курпсайской плотины во времени $t/\Delta t$.

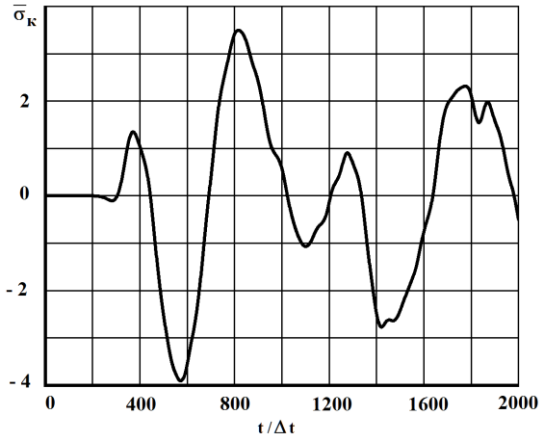


Рисунок 12. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 8 на контуре Курпсайской плотины во времени $t/\Delta t$.

Исследуемая расчетная область имеет 953 узловых точек. Курпсайская плотина аппроксимирована 224 узловыми точками.

На рис. 4 показано изменение контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 9 во времени $\bar{t}$, полученное с помощью интеграла Дюамеля при воздействии типа полупериода синусоиды при $\lambda / H = 3$ (λ – длина волны): 1 – результаты численного решения, полученные методом конечных элементов в перемещениях [18, 20 и 22]; 2 – результаты численного решения, полученные смешанным методом конечных элементов [18, 20 и 22]. Расхождение для максимального упругого контурного напряжения составляет 5 %.

На рис. 5-12 показано изменение контурных напряжений $\bar{\sigma}_k$ в Курпсайской плотине во времени $t/\Delta t$.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Сравнение с результатами смешанного метода конечных элементов показало их хорошее совпадение, что позволяет сделать заключение о физической достоверности результатов численного решения.
2. Максимальное растягивающее напряжение возникает в верхней части задней области контура плотины.
3. Упругое контурное напряжение на гранях плотины является почти зеркальным отражением одна другой, то есть антисимметричным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кольский Г.** Волны напряжений в твердых телах. – М.: Иностранная литература, 1955. – 192 с.
2. **Дэйвис Р.** Волны напряжений в твердых телах. – М.: Иностранная литература, 1961. – 104 с.

3. **Мусхелишвили Н. И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 708 с.
4. **Слепян Л.И.** Нестационарные упругие волны. – Л.: Судостроение, 1972. – 351 с.
5. **Тимошенко С.П., Гудьер Д.** Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
6. **Ионов В.И., Огибалов П.М.** Напряжения в телах при импульсивном нагружении. – М.: Высшая школа, 1975. – 464 с.
7. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. – М: Мир, 1975. – 543 с.
8. **Новацкий В.** Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
9. **Амензаде Ю.А.** Теория упругости. – М.: Высшая школа, 1976. – 272 с.
10. **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
11. **Калиткин Н.Н.** Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
12. **Бате К., Вилсон Е.** Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
13. **Филиппов И.Г., Немчинов В.В.** Однородный разностный алгоритм решения плоских динамических задач теории упругости в областях сложной формы // Тезисы докладов конференции по распространению упругих и упругопластических волн. – Фрунзе: Фрунзенский политехнический институт, 1983. – Ч. 1. – С. 75–76.
14. **Хесин Г.Л., Филиппов И.Г., Костин И.Х., Мусаев В.К., Немчинов В.В.** Применение методов численного анализа и динамической фотоупругости для исследования напряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений при сейсмических воздействиях // Четвертое научно-техническое совещание Гидропроекта «Совершенствование научных исследований, ускорение внедрения достижений науки и техники в проекты с целью повышения эффективности строительства и эксплуатации ГЭС, ГАЭС и АЭС». – М.: Гидропроект, 1982, Ч. 1, с. 86–87.
15. **Зенкевич О., Морган К.** Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 320 с.
16. **Мусаев В.К.** Воздействие нестационарной упругой волны на плотину треугольного профиля // Строительство и архитектура, 1990, №9, с. 72–74.
17. **Мусаев В.К.** Воздействие нестационарной упругой волны на Курпсайскую плотину // Строительство и архитектура, 1990, №12, с. 69-71.
18. **Musayev V.K.** Structure design with seismic resistance foundations // Proceedings of the ninth European conference on earthquake engineering. Moscow: TsNIISK, 1990, V. 4–A, pp. 191-200.
19. **Кукуджанов В.Н.** Численные методы решения задач механики деформируемого твердого тела. – М.: МФТИ, 1990. – 96 с.
20. **Musayev V.K.** Testing of stressed state in the structure-base system under non-stationary dynamic effects // Proceedings of the second International conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics. – Sent Louis: University of Missouri-Rolla, 1991. – V. 3. – P. 87–97.
21. **Угодчиков А.Г.** Об уравнениях динамики деформируемого твердого тела // ДАН СССР, 1991, Т. 317, №4, с. 859-863.
22. **Мусаев В.К.** Численное решение волновых задач теории упругости и пластичности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия прикладная математика и информатика, 1997, №1, с. 87-110.
23. **Musayev V.K.** Problem of the building and the base interaction under seismic loads // Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. 2741. Auckland: University of Canterbury, 2000, pp. 1-6.
24. **Мусаев В.К.** Определение безопасности здания с основанием при воздействии

ускорения землетрясения Эль-Центро // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 2000, Вып. 2, с. 141-146.
25. **Мусаев В.К.** Численное моделирование безопасности системы «дымовая труба-фундамент-основание» при сейсмических воздействиях // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 2000, Вып. 3, с. 60-66.
26. **Мусаев В.К.** Моделирование безопасности плотин с основанием при сейсмических воздействиях // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 2000, Вып. 4, с. 112-117.
27. **Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В.** Волны в сплошных средах. – М.: Физматлит, 2004. – 472 с.
28. **Мусаев В.К.** Численное решение некоторых задач безопасности жизнедеятельности с помощью метода конечных элементов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2005, №1, с. 17–23.
29. **Мусаев В.К.** Определение качества сооружений в детерминированной постановке с помощью математического мониторинга // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2005, №1, с. 42–47.
30. **Мусаев В.К.** Волновая теория сейсмостойкости в задаче об оценке сложного напряженного состояния Курпсайской плотины с основанием // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2005, №2, с. 13-19.
31. **Мусаев В.К.** Определение волновых сейсмических напряжений в Курпсайской плотине с основанием при фундаментальном воздействии в виде функции Хевисада // Безопасность и экология технологических процессов и производств. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Поселок Персиановский Ростовской области: Донской государственный аграрный университет, 2006, с. 78-83.
32. **Мусаев В.К.** О некоторых возможностях математического моделирования и численного компьютерного эксперимента // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2006, №1, с. 81-86.
33. **Мусаев В.К.** Математическое моделирование упругих волн напряжений в сложных деформируемых телах // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2007, №1, с. 62-76.
34. **Мусаев В.К.** Об оценке достоверности и точности численного решения нестационарных динамических задач // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2007, №3, с. 48-60.
35. **Мусаев В.К.** Численное моделирование упругих сейсмических волн напряжений в сложных деформируемых телах // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2007, №4, с. 6-22.
36. **Мусаев В.К.** Численное, аналитическое и экспериментальное решение задачи о концентрации нестационарных динамических напряжений в свободном круглом отверстии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2008, №4, с. 67-71.
37. **Мусаев В.К.** Оценка достоверности и точности результатов вычислительного эксперимента при решении задач нестационарной волновой теории упругости // Научный журнал проблем комплексной безопасности, 2009, №1, с. 55-80.
38. **Мусаев В.К.** Оценка напряженного состояния Курпсайской плотины с грунтовым основанием с помощью фундаментальной волновой теории сейсмостойко-

сти // Безопасность и экология технологических процессов и производств. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Поселок Персиановский Ростовской области: Донской государственный аграрный университет, 2009, с. 162-166.

39. **Мусаев В.К., Ганиев Р.Ф., Нигматулин Р.И., Соловьев А.А., Сущев С.П.** О приоритетах опасности при оценке безопасности сложных технических объектов // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XVII Международной конференции. – М.: РГГУ, 2009, с. 240-244.
40. **Мусаев В.К., Шиянов М.И., Попов А.А., Ситник В.Г., Федоров А.Л.** О мониторинге эксплуатационной безопасности строительного объекта // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XVII Международной конференции. – М.: РГГУ, 2009, с. 315-319.
41. **Сазонов К.Б., Кормилицин А.И., Куранцов В.В., Маркина О.Ф.** О моделировании волн напряжений // Безопасность и экология технологических процессов и производств. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Поселок Персиановский Ростовской области: Донской государственный аграрный университет, 2010, с. 224–225.
42. **Мусаев В.К., Сущев С.П., Калиберда И.В., Джинчвелашвили Г.А., Бедняков В.Г.** О моделировании и прогнозировании слабых мест в области безопасности несущих конструкций уникальных объектов // Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго и ресурсосбережение: Т38. Материалы Международной научно-практической конференции. Выпуск XII. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный строительный университет, 2010, с. 420-426.
43. **Ситник С.В., Сазонов К.Б., Шиянов С.М., Куранцов В.В., Кормилицин А.И.** Моделирование волнового напряженного состояния в объектах сложной формы с помощью численного метода Мусаева В.К. в перемещениях // Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго- и ресурсосбережение: Т38. Материалы Международной научно-практической конференции. Выпуск XIII. Т. 2. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный строительный университет, 2011, с. 262-268.
44. **Мусаев В.К.** О возможных сценариях развития аварий на гидротехнических сооружениях // Стратегическая стабильность, 2011, №3, с. 53-56.
45. **Мусаев В.К., Ганиев Р.Ф., Нигматулин Р.И., Сущев С.П., Акатьев С.В.** О прогнозировании последствий чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XIX Международной конференции. – М.: РГГУ, 2011, с. 51-54.
46. **Мусаев В.К., Ситник С.В., Куранцов В.В., Шиянов С.М., Денисенков А.Н.** О сейсмической устойчивости гидротехнических сооружений // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XIX Международной конференции. – М.: РГГУ, 2011, с. 228-231.
47. **Мусаев В.К.** О возможных сценариях развития аварий на гидротехнических сооружениях // Стратегическая стабильность, 2011, №3, с. 53-56.
48. **Мусаев В.К., Шиянов М.И., Дзыбов М.М., Клиновицкий С.А.** Об анализе безопасности и технического состояния строительных объектов // Стратегическая стабильность, 2011, №3, с. 71-73.
49. **Сазонов К.Б., Сущев Т.С., Шепелина П.В., Куранцов О.В., Акатьев С.В.** Моделирование нестационарного волнового напряженного состояния в деформируемых объектах с помощью численного метода Мусаева В.К. в перемещениях // Информационно-телекоммуникационные технологии и

математическое моделирование высокотехнологичных систем. Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием. – М.: РУДН, 2012, с. 332-334.

50. **Мусаев В.К., Ситник С.В., Куранцов В.А., Сазонов К.Б., Акатьев Д.В.** Численное моделирование волн напряжений в Курпсайской плотине // Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования: сборник научных трудов Всероссийской молодежной конференции. М.: РГСУ, 2012, с. 65-70.
51. **Мусаев В.К.** О безопасности гидротехнических сооружений при чрезвычайных ситуациях природного, техногенного и экологического характера // Безопасность и экология технологических процессов и производств. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Поселок Персиановский Ростовской области: Донской государственный аграрный университет, 2012, с. 237-241.
52. **Мусаев В.К.** Численное моделирование технических средств защиты уникальных объектов от нестационарных сейсмических воздействий // Экология пограничной области. Материалы Международной научной конференции. – Гожув Влкп.– Познань, Польша: Институт научных исследований и экспертиз, 2012, с. 396-407.
53. **Сущев Т.С., Юзбеков Н.С., Ситник В.Г., Тарасенко А.А., Денисюк Д.А.** О применении численного метода Мусаева В.К. в перемещениях для моделирования воздействия плоской продольной волны в виде прямоугольного импульса на упругую полуплоскость // Актуальные проблемы техногенной и экологической безопасности. Сборник научных работ. Выпуск 7. – М.: РГСУ, 2012, с. 439-446.
54. **Сущев Т.С., Ситник С.В., Акатьев С.В., Денисюк Д.А., Зюбина М.В.** О моделировании взаимодействия плоской продольной волны в виде функции Хевисайда на упругую полуплоскость с помощью численного метода Мусаева В.К. в перемещениях // Актуальные проблемы техногенной и экологической безопасности. Сборник научных работ. Выпуск 7. – М.: РГСУ, 2012, с. 447-454.
55. **Сущев Т.С., Юзбеков Н.С., Ситник В.Г., Тарасенко А.А., Денисюк Д.А.** О моделировании интерференции плоских продольных упругих волн напряжений в виде дельта функции с помощью численного метода Мусаева В.К. в перемещениях // Актуальные проблемы техногенной и экологической безопасности. Сборник научных работ. Выпуск 7. – М.: РГСУ, 2012, с. 454-462.
56. **Сущев Т.С., Юзбеков Н.С., Ситник В.Г., Тарасенко А.А., Денисюк Д.А.** Применение численного метода Мусаева В.К. в перемещениях для моделирования волн напряжений в Курпсайской плотине // Актуальные проблемы техногенной и экологической безопасности. Сборник научных работ. Выпуск 7. – М.: РГСУ, 2012, с. 470-477.
57. **Мусаев В.К.** О безопасности объектов экономики при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера // Проблемы безопасности российского общества, 2012, №3, с. 50-55.
58. **Мусаев В.К.** О безопасности несущих конструкций строительных объектов экономики // Проблемы безопасности российского общества, 2012, №4, с. 101-107.
59. **Мусаев В.К.** О методах оценки эксплуатационной безопасности объектов экономики // Проблемы безопасности российского общества, 2012, №4, с. 122-128.
60. **Мусаев В.К.** Практическая реализация математического мониторинга комплексной безопасности объектов экономики // Экология пограничной области. Материалы Международной научной конференции. – Гожув Влкп.–Познань,

Польша: Институт научных исследований и экспертиз, 2012, с. 227-240.

61. **Мусаев В.К.** Численное моделирование технических средств защиты уникальных объектов от нестационарных сейсмических воздействий // Экология пограничной области. Материалы Международной научной конференции. – Гожув Влкп.–Познань, Польша: Институт научных исследований и экспертиз, 2012, с. 396-407.
62. **Мусаев В.К.** Математическое моделирование системы «сооружение-окружающая среда» на ударные, взрывные и сейсмические воздействия // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – М.: РУДН, 2013, с. 197-200.
63. **Юзбеков Н.С., Сущев Т.С., Ситник С.В., Тарасенко А.А., Зюбина М.В.** Математическое моделирование безопасности сооружений при волновых сейсмических воздействиях с помощью численного метода Мусаева В.К. в перемещениях // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – М.: РУДН, 2013, с. 234-237.
64. **Nemchinov V.V.** Numerical methods for solving flat dynamic elasticity problems // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2013, Volume 9, Issue 1, pp. 90-97.

Мусаев Вячеслав Кадыр оглы – почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры экологического мониторинга и прогнозирования Российского университета дружбы народов; 117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, тел. +7(926) 5670558.
E-mail: musayev-vk@yandex.ru

Musayev Vyacheslav Kadyr ogly, Honorary worker of higher professional education of the Russian Federation, doctor of technical Sciences, Professor, Professor of the chair of ecological monitoring and prognostication of the Russian University of friendship of peoples; 6, st. Miklukho-Maklay, 117198, Moscow, Russia;
tel. +7(926)5670558. E-mail: musayev-vk@yandex.ru

DOI:10.22337/1524-5845-2016-12-3-84-94

О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ УПРУГИХ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛОТИНЕ КОЙНА С ОСНОВАНИЕМ (ПОЛУПЛОСКОСТЬ)

В.К. Мусаев
Российский университет дружбы народов, г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: Рассматриваются некоторые вопросы численного моделирования сейсмической безопасности бетонной плотины Койна с грунтовым основанием при волновых воздействиях. Максимальное растягивающее напряжение возникает в верхней части задней области контура плотины. Упругое контурное напряжение на гранях плотины является почти зеркальным отражением одна другой, то есть антисимметричным. Выполненные исследования динамического напряженного состояния показали характер разрушений, наблюдаемых в плотине Койна после землетрясения.

Ключевые слова: математическое моделирование, контурные напряжения, бетонная плотина Койна, волновая теория сейсмостойкости, динамическая теория упругости, перемещение, скорость перемещений, ускорение, сейсмическое воздействие, функция Хевисайда, метод конечных элементов, комплекс программ, узловые точки, явная двухслойная схема

NUMERICAL SIMULATION OF NON-STATIONARY SEISMIC STRESSES IN ELASTIC WAVES DAM KOYNA WITH BASE (HALF-PLANE)

Vyacheslav K. Musayev
Russian University of friendship of peoples, Moscow, RUSSIA

Abstract: Discusses some of the issues of numerical modeling of seismic safety of the concrete dam Koyna, ground base under wave influences. The maximum tensile stress occurs in the upper part of the back area around the dam. Elastic loop voltage on the faces of the dam is almost a mirror reflection of one another, that is, by the antisymmetric. Investigation of dynamic stress state showed the damage observed in the dam Koyna after the earthquake.

Key words: mathematical modeling, grid voltages, concrete dam Koyna, the wave theory of seismic stability, dynamic theory of elasticity, displacement, velocity, displacement, acceleration, seismic impact Heaviside function, the finite element method, complex programs, anchor points, an explicit two-layer scheme.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЛНОВЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Постановки, численные методы, технология программных комплексов и анализ результатов решения нестационарных динамических задач для областей сложной формы рассмотрены в следующих работах [1-57].

Нестационарные сейсмические воздействия распространяются в различных сооружениях с учетом физических закономерностей волн. Знание закономерностей волнового поля позволяет более точно выбрать метод решения задачи и сделать глубокий анализ волнового напряженного состояния.

Импульсное воздействие характеризуется внезапностью приложения и кратковременностью действия. Возмущения распространяются с конечной скоростью.

Волны напряжений различной природы, распространяясь, в деформируемом теле взаи-

модействуют, друг с другом, что приводит к образованию новых областей возмущений. При интерференции волн их интенсивности складываются. Они могут достигать значений, которые превосходят предел прочности материала. В этом случае происходит разрушение материала.

После трехкратного или четырехкратного прохождения и отражения волн напряжений в теле процесс распространения возмущений становится установившимся. В этом случае напряжения и деформации усредняются. Тело находится в колебательном движении.

С помощью метода конечных элементов в перемещениях решаем задачу двумерной плоской динамической задачи теории упругости с начальными и граничными условиями.

Для решения задачи о моделировании упругих нестационарных волн напряжений в деформируемых областях сложной формы рассмотрим некоторое тело Γ в прямоугольной декартовой системе координат XOY (рис. 1), которому в начальный момент времени $t = 0$ сообщается механическое нестационарное импульсное воздействие.

Предположим, что тело Γ изготовлено из однородного изотропного материала, подчиняющегося упругому закону Гука при малых упругих деформациях.

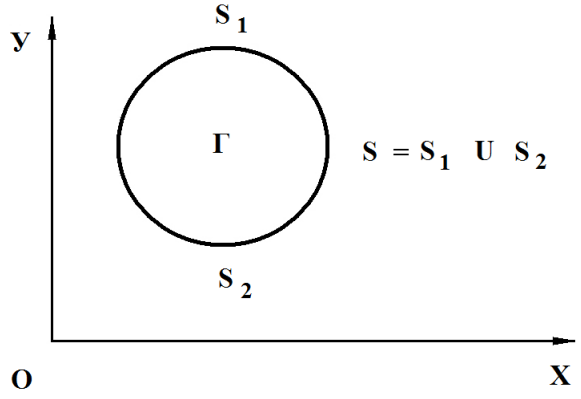


Рисунок 1. Некоторое тело Γ в прямоугольной декартовой системе координат XOY.

Точные уравнения двумерной (плоское напряженное состояние) динамической теории упругости имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial Y} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial Y} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \ (x,y) \in \Gamma,$$

$$\sigma_x = \rho C_p^2 \varepsilon_x + \rho (C_p^2 - 2C_s^2)\varepsilon_y,$$

$$\sigma_y = \rho C_p^2 \varepsilon_y + \rho (C_p^2 - 2C_s^2)\varepsilon_x,$$

$$\tau_{xy} = \rho C_s^2 \gamma_{xy},$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial X}, \ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial Y},$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial Y} + \frac{\partial v}{\partial X}, \quad (x,y) \in (\Gamma \cup S), \quad (1)$$

где: σ_x, σ_y и τ_{xy} – компоненты тензора упругих напряжений; ε_x, ε_y и γ_{xy} – компоненты тензора упругих деформаций; u и v – составляющие вектора упругих перемещений вдоль осей OX и OY соответственно; ρ – плотность материала;

$$C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$$

– скорость продольной упругой волны;

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

– скорость поперечной упругой волны; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; $S\ (S_1 \cup S_2)$ – граничный контур тела Γ.

Систему (1) в области, занимаемой телом Γ, следует интегрировать при начальных и граничных условиях.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМА

Для решения двумерной плоской динамической задачи теории упругости с начальными и граничными условиями (1) используем метод конечных элементов в перемещениях.

Задача решается методом сквозного счета, без выделения разрывов.

Основные соотношения метода конечных элементов получены с помощью принципа возможных перемещений.

Чтобы выполнить динамический расчет методом конечных элементов, нужно иметь матрицу жесткости и матрицу инерции конечного элемента.

Принимая во внимание определение матрицы жесткости, вектора инерции и вектора внешних сил для тела Γ, записываем приближенное значение уравнения движения в теории упругости

$$\overline{H}\ddot{\vec{\Phi}} + \overline{K}\vec{\Phi} = \vec{R},$$
$$\vec{\Phi}\big|_{t=0} = \vec{\Phi}_0, \quad \dot{\vec{\Phi}}\big|_{t=0} = \dot{\vec{\Phi}}_0, \qquad (2)$$

где: $\overline{H}$ – диагональная матрица инерции; $\overline{K}$ – матрица жесткости; $\vec{\Phi}$ – вектор узловых упругих перемещений; $\dot{\vec{\Phi}}$ – вектор узловых упругих скоростей перемещений; $\ddot{\vec{\Phi}}$ – вектор узловых упругих ускорений; $\vec{R}$ – вектор внешних узловых упругих сил.

Соотношение (2) система линейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка в перемещениях с начальными условиями.

Таким образом, с помощью метода конечных элементов в перемещениях, линейную задачу с начальными и граничными условиями (1) привели к линейной задаче Коши (2).

Определим упругое контурное напряжение на границе области, свободной от нагрузок.

С помощью вырождения прямоугольного конечного элемента с четырьмя узловыми точками получим контурный конечный элемент с двумя узловыми точками (рис. 2).

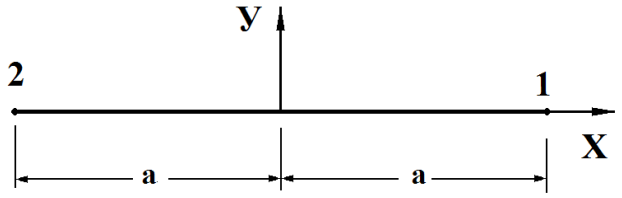


Рисунок 2. Контурный конечный элемент с двумя узловыми точками.

При повороте оси x на угол α против часовой стрелки, получим упругое контурное напряжение σ_k в центре тяжести контурного конечного элемента с двумя узловыми точками

$$\sigma_k = (E/(2a(1-\nu^2)))((u_1 - u_2)\cos\alpha + (v_1 - v_2)\sin\alpha). \qquad (3)$$

Для интегрирования уравнения (2) конечноэлементным вариантом метода Галеркина приведем его к следующему виду

$$\overline{H}\frac{d}{dt}\dot{\vec{\Phi}} + \overline{K}\vec{\Phi} = \vec{R}, \quad \frac{d}{dt}\vec{\Phi} = \dot{\vec{\Phi}}. \qquad (4)$$

Интегрируя по временной координате соотношение (4) с помощью конечноэлементного варианта метода Галеркина, получим двумерную явную двухслойную конечноэлементную линейную схему в перемещениях для внутренних и граничных узловых точек

$$\dot{\vec{\Phi}}_{i+1} = \dot{\vec{\Phi}}_i + \Delta t\overline{H}^{-1}(-\overline{K}\vec{\Phi}_i + \vec{R}_i),$$
$$\vec{\Phi}_{i+1} = \vec{\Phi}_i + \Delta t\dot{\vec{\Phi}}_{i+1}. \qquad (5)$$

Основные соотношения метода конечных элементов в перемещениях получены с помощью принципа возможных перемещений и конечноэлементного варианта метода Галеркина.

Рассмотрим устойчивость двумерной явной двухслойной конечноэлементной линейной схемы в перемещениях для внутренних и граничных узловых точек на квазирегулярных сетках.

Общая теория численных уравнений математической физики требует для этого наложение определенных условий на отношение шагов по временной координате Δt и по пространственным координатам, а именно

$$\Delta t = k \frac{min \Delta l_i}{C_p} \ (i = 1,\ 2,\ 3,...), \quad (6)$$

где: Δl – длина стороны конечного элемента.

Устойчивость двумерной явной двухслойной конечноэлементной линейной схемы в перемещениях для внутренних и граничных узловых точек на квазирегулярных сетках исследуем с помощью численного эксперимента.

Результаты численного эксперимента показали, что при k = 0,5 обеспечивается устойчивость двумерной явной двухслойной конечноэлементной линейной схемы в перемещениях для внутренних и граничных узловых точек на квазирегулярных сетках.

Для исследуемой области, состоящей из материалов с разными физическими свойствами, выбирается минимальный шаг по временной координате (6).

Для аппроксимации по пространственным переменным применяются треугольные конечные элементы с тремя узловыми точками с линейной аппроксимацией упругих перемещений и прямоугольные конечные элементы с четырьмя узловыми точками с билинейной аппроксимацией упругих перемещений.

Для аппроксимации по временной переменной применяются линейные конечные элементы с двумя узловыми точками с линейной аппроксимацией упругих перемещений.

За основные неизвестные в узловой точке приняты два перемещения и две скорости перемещений для линейной задачи.

С помощью предельного перехода показано, что конечноэлементные схемы удовлетворяют условиям сходимости.

Аналитическое исследование устойчивости конечноэлементных схем показало, что они удовлетворяют условию устойчивости Неймана.

На основе метода конечных элементов в перемещениях разработаны алгоритм и комплекс программ для решения линейных плоских двумерных задач, которые позволяют решать сложные задачи при сейсмических воздействиях на уникальные сооружения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЛНОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛОТИНЕ КОЙНА

Рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны на плотину Койна с основанием (рис. 3).

Начальные условия приняты нулевыми. В сечении на расстоянии 1,5H (рис. 3) (H = 103 м) при $0 \le n \le 25$ ($n = t / \Delta t$) скорости упругих перемещений $\dot{u}$ и $\dot{v}$ изменяются линейно от 0 до $\dot{u} = P \sin\alpha$ и $\dot{v} = P \cos\alpha$, а при n > 25 $\dot{u} = P \sin\alpha$ и $\dot{v} = P \cos$ ($P = \sigma_0 /(\rho C_p)$, σ_0 = 0,1 МПа (1 кгс/см^2)).

Контур плотины $IJKABCDEF$ (кроме точки E) предполагается свободным от нагрузок при $t > 0$.

Граничные условия для контура $FGHI$ при $t > 0$ $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$.

Отраженные волны от контура $FGHI$ не доходят до исследуемых точек при $0 \le n \le 900$.

Исследуемая расчетная область имеет 522 узловые точки.

Расчеты проведены при следующих исходных данных: H = 103 м; $\Delta t = 0{,}104 \cdot 10^{-2}$ с; $E = 0{,}36 \cdot 10^4$ МПа ($0{,}36 \cdot 10^5$ кгс/см^2); ν = 0,36; $\rho = 0{,}122 \cdot 10^4$ кг/м^3 ($0{,}122 \cdot 10^{-5}$ кгс с^2/см^4); C_ρ = 1841 м/с.

На рис. 4-11 показано изменение контурных напряжений $\bar{\sigma}_k$ в плотине Койна в точках 1–8 во времени $t / \Delta t$.

На рис. 12 показано изменение контурных напряжений в точках 3 и 7 на контуре плотины Койна во времени $t / \Delta t$.

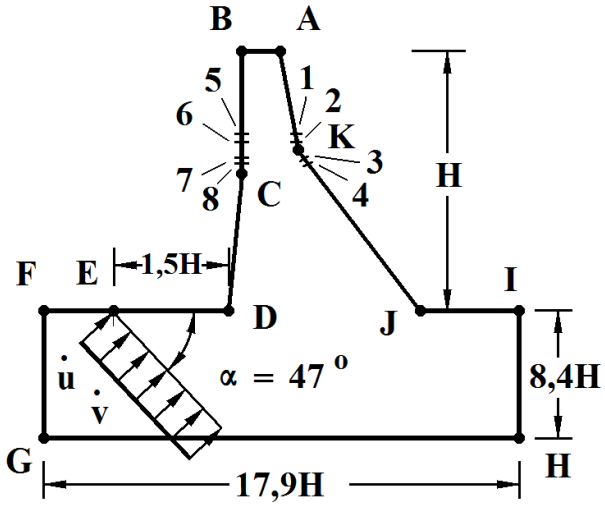


Рисунок 3. *Постановка задачи для системы сооружение-основание (плотина Койна).*

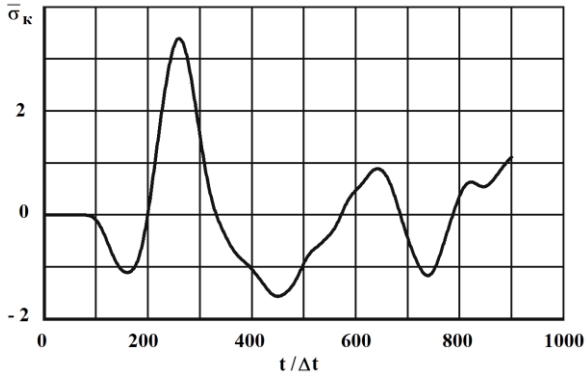


Рисунок 4. *Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 1 на контуре плотины Койна во времени $t / \Delta t$.*

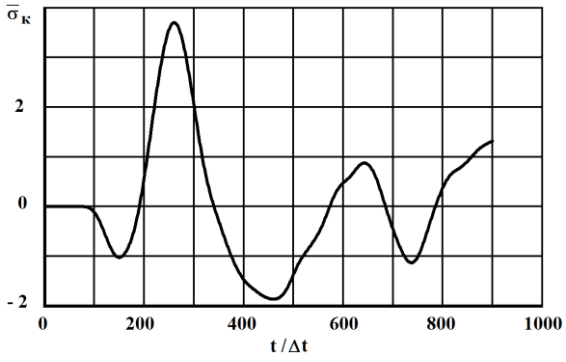


Рисунок 5. *Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 2 на контуре плотины Койна во времени $t / \Delta t$.*

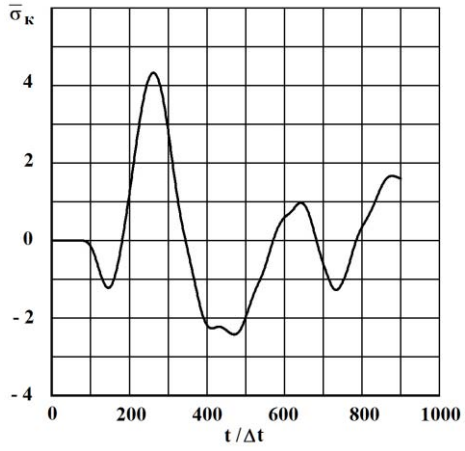


Рисунок 6. *Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 3 на контуре плотины Койна во времени $t / \Delta t$.*

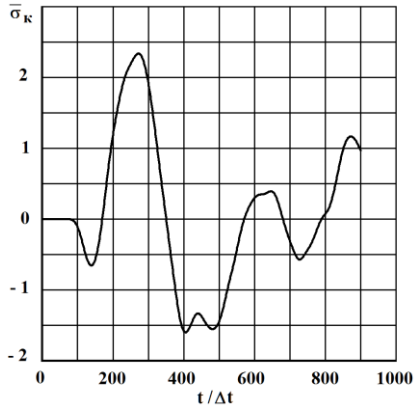


Рисунок 7. *Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 4 на контуре плотины Койна во времени $t / \Delta t$.*

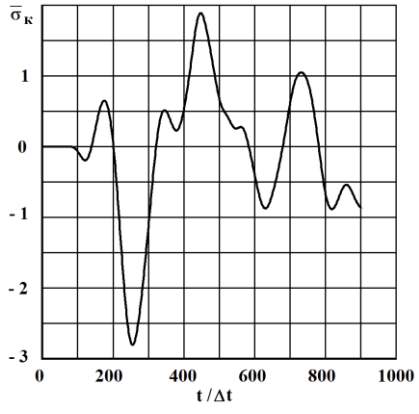


Рисунок 8. *Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 5 на контуре плотины Койна во времени $t / \Delta t$.*

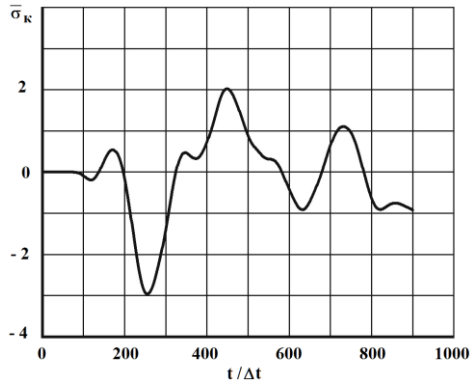


Рисунок 9. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 6 на контуре плотины Койна во времени $t / \Delta t$.

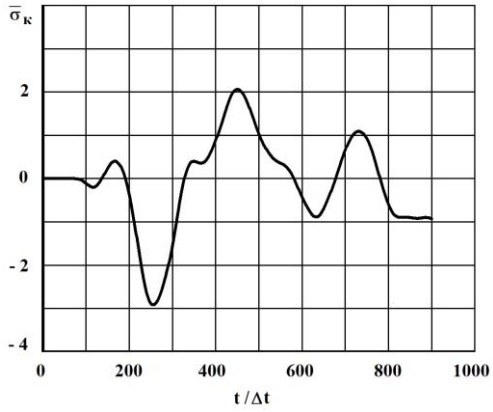


Рисунок 10. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 7 на контуре плотины Койна во времени $t / \Delta t$.

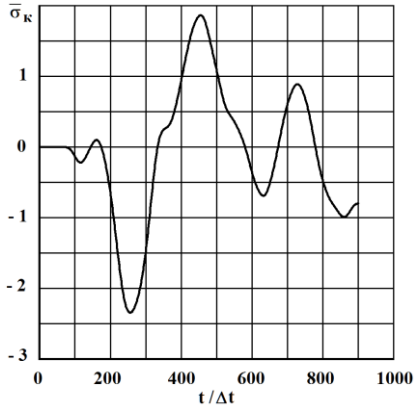


Рисунок 11. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точке 8 на контуре плотины Койна во времени $t / \Delta t$.

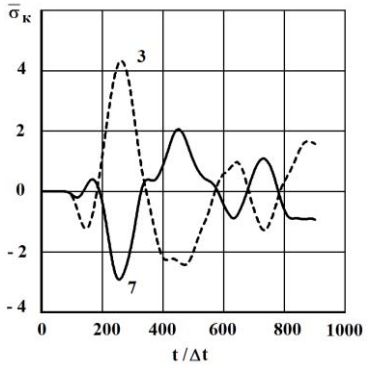


Рисунок 12. Изменение контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ в точках 3 и 7 на контуре плотины Койна во времени $t / \Delta t$.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Максимальное растягивающее напряжение возникает в верхней части задней области контура плотины.
2. Упругое контурное напряжение на гранях плотины является почти зеркальным отражением одна другой, то есть антисимметричным.
3. Выполненное исследование показало, что результаты численных исследований соответствуют характеру разрушений, наблюдаемых в плотине Койна после землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кольский Г.** Волны напряжений в твердых телах. – М.: Иностранная литература, 1955. – 192 с.
2. **Дэйвис Р.** Волны напряжений в твердых телах. – М.: Иностранная литература, 1961. – 104 с.
3. **Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д.** Элементы прикладной математики. – М.: Наука, 1972. – 592 с.
4. **Тимошенко С.П., Гудьер Д.** Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.

5. **Ионов В.И., Огибалов П.М.** Напряжения в телах при импульсивном нагружении. – М.: Высшая школа, 1975. – 464 с.
6. **Мусаев В.К.** Решение плоской динамической задачи теории упругости с помощью МКЭ с применением треугольного элемента с тремя узловыми точками // Труды МИСИ, 1976, №137, с. 48–50.
7. **Бате К., Вилсон Е.** Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
8. **Хесин Г.Л., Филиппов И.Г., Костин И.Х., Мусаев В.К., Немчинов В.В.** Применение методов численного анализа и динамической фотоупругости для исследования напряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений при сейсмических воздействиях // Четвертое научно-техническое совещание Гидропроекта «Совершенствование научных исследований, ускорение внедрения достижений науки и техники в проекты с целью повышения эффективности строительства и эксплуатации ГЭС, ГАЭС и АЭС». – М.: Гидропроект, 1982, Ч. 1, с. 86-87.
9. **Филиппов И.Г., Немчинов В.В.** Однородный разностный алгоритм решения плоских динамических задач теории упругости в областях сложной формы // Тезисы докладов конференции по распространению упругих и упругопластических волн. – Фрунзе: Фрунзенский политехнический институт, 1983, Ч. 1, с. 75-76.
10. **Кукуджанов В.Н.** Численные методы решения задач механики деформируемого твердого тела. – М.: МФТИ,1990.–96с.
11. **Мусаев В.К.** Воздействие нестационарной упругой волны на плотину Койна // Строительство и архитектура, 1990, №6, с. 70-72.
12. **Мусаев В.К.** Воздействие нестационарной упругой волны на плотину треугольного профиля // Строительство и архитектура, 1990, №9, с. 72-74.
13. **Musayev V.K.** Structure design with seismic resistance foundations // Proceedings of the ninth European conference on earthquake engineering. – Moscow: TsNIISK, 1990, V. 4–A, pp. 191-200.
14. **Musayev V.K.** Testing of stressed state in the structure-base system under non-stationary dynamic effects // Proceedings of the second International conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics. Sent Louis: University of Missouri-Rolla, 1991, V. 3, pp. 87-97.
15. **Мусаев В.К.** Численное решение волновых задач теории упругости и пластичности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия прикладная математика и информатика, 1997, №1, с. 87-110.
16. **Musayev V.K.** Problem of the building and the base interaction under seismic loads // Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. 2741. Auckland: University of Canterbury, 2000, pp. 1-6.
17. **Мусаев В.К.** Определение безопасности здания с основанием при воздействии ускорения землетрясения Эль-Центро // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 2000, Вып. 2, с. 141-146.
18. **Мусаев В.К.** Численное моделирование безопасности системы «дымовая труба-фундамент-основание» при сейсмических воздействиях // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 2000, Вып. 3, с. 60-66.
19. **Мусаев В.К.** Моделирование безопасности плотин с основанием при сейсмических воздействиях // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 2000, Вып. 4, с. 112-117.
20. **Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В.** Волны в сплошных средах. – М.: Физматлит, 2004. – 472 с.

21. **Мусаев В.К.** Анализ риска в задачах безопасности населения и территорий. – М.: РУДН, 2005. – 21 с.
22. **Мусаев В.К.** Методы управления риском в политике смягчения последствий чрезвычайных ситуаций. – М.: РУДН, 2005. – 24 с.
23. **Мусаев В.К.** Нормативная база расчета на безопасность уникальных сооружений. – М.: РУДН, 2005. – 28 с.
24. **Мусаев В.К., Жидков Е.П., Севастьянов Л.А.** Аналитические методы теоретической физики в задачах моделирования катастроф // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2005, №1, с. 6–8.
25. **Мусаев В.К., Жидков Е.П., Севастьянов Л.А.** Вычислительные методы теоретической физики в задачах моделирования катастроф // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2005, №1, с. 9-12.
26. **Мусаев В.К.** Численное решение некоторых задач безопасности жизнедеятельности с помощью метода конечных элементов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2005, №1, с. 17-23.
27. **Мусаев В.К.** Определение качества сооружений в детерминированной постановке с помощью математического мониторинга // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2005, №1, с. 42-47.
28. **Мусаев В.К.** О сейсмической безопасности бетонной плотины Койна с грунтовым основанием при волновых воздействиях // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2005, №2, с. 6-12.
29. **Мусаев В.К.** О безопасности бетонной плотины Койна с основанием при сейсмических волновых воздействиях // Техносферная безопасность, надежность, качество, энергосбережение: Т38. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Выпуск VII. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный строительный университет, 2005, с. 423-427.
30. **Мусаев В.К.** Волновая теория сейсмостойкости в задаче о безопасности бетонной плотины Койна с грунтовым основанием // Безопасность и экология технологических процессов и производств. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Поселок Персиановский Ростовской области: Донской государственный аграрный университет, 2006, с. 73-78.
31. **Мусаев В.К.** О некоторых возможностях математического моделирования и численного компьютерного эксперимента // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2006, №1, с. 81-86.
32. **Мусаев В.К.** Математическое моделирование упругих волн напряжений в сложных деформируемых телах // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2007, №1, с. 62-76.
33. **Мусаев В.К.** Об оценке достоверности и точности численного решения нестационарных динамических задач // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2007, №3, с. 48-60.
34. **Мусаев В.К.** Численное моделирование упругих сейсмических волн напряжений в сложных деформируемых телах // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности, 2007, №4, с. 6-22.
35. **Мусаев В.К.** Численное, аналитическое и экспериментальное решение задачи о концентрации нестационарных динами-

ческих напряжений в свободном круглом отверстии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности. – 2008, №4, с. 67-71.

36. **Мусаев В.К.** Оценка достоверности и точности результатов вычислительного эксперимента при решении задач нестационарной волновой теории упругости // Научный журнал проблем комплексной безопасности, 2009, №1, с. 55-80.
37. **Мусаев В.К.** Определение динамических концентраций напряжений в бетонной плотине Койна с помощью математического мониторинга сейсмической безопасности // Безопасность и экология технологических процессов и производств. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Поселок Персиановский Ростовской области: Донской государственный аграрный университет, 2009, с. 166-170.
38. **Тахо-Годи А.З., Ситник С.В., Куранцов В.В., Кормилицин А.И., Акатьев С.В.** Достоверность результатов численного метода Мусаева В.К. в перемещениях при решении задачи об отражении упругих волн напряжений в виде дельта функции от свободной поверхности // Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго- и ресурсосбережение: Т38. Материалы Международной научно-практической конференции. Выпуск XIII. Т. 2. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный строительный университет, 2011, с. 280-284.
39. **Мусаев В.К.** О безопасности бетонной плотины Койна с грунтовым основанием по несущей способности при волновых сейсмических воздействиях // Ревальвация публичной безопасности. Материалы Международной научной конференции. – Гожув Влкп.–Познань, Польша: Институт научных исследований и экспертиз, 2011, с. 295-304.
40. **Мусаев В.К.** О моделировании безопасности системы плотина-основание (плотина Койна) по несущей способности при волновых сейсмических воздействиях // Вестник НИЦ строительство. Исследования по теории сооружений. – 2011, №3-4, с. 112-119.
41. **Мусаев В.К.** О возможных сценариях развития аварий на гидротехнических сооружениях // Стратегическая стабильность, 2011, №3, с. 53-56.
42. **Мусаев В.К., Ганиев Р.Ф., Нигматулин Р.И., Сущев С.П., Акатьев С.В.** О прогнозировании последствий чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XIX Международной конференции. – М.: РГГУ, 2011, с. 51-54.
43. **Мусаев В.К., Ситник С.В., Куранцов В.В., Шиянов С.М., Денисенков А.Н.** О сейсмической устойчивости гидротехнических сооружений // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XIX Международной конференции. – М.: РГГУ, 2011, с. 228-231.
44. **Мусаев В.К.** Моделирование нестационарных волн напряжений в плотине Койна при волновых сейсмических воздействиях // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием. – М.: РУДН, 2012, с. 315-317.
45. **Сазонов К.Б., Сущев Т.С., Шепелина П.В., Куранцов О.В., Акатьев С.В.** Моделирование нестационарного волнового напряженного состояния в деформируемых объектах с помощью численного метода Мусаева В.К. в перемещениях // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием. – М.: РУДН, 2012, с. 332-334.

46. **Мусаев В.К.** Безопасность бетонной плотины Койна с грунтовым основанием по несущей способности при сейсмических нестационарных волновых воздействиях // Инновационные технологии в развитии строительства, машин и механизмов для строительства и коммунального хозяйства, текущего содержания и ремонта железнодорожного пути. Сборник трудов международной научно-технической конференции. – Смоленск: Смоленский филиал МИИТ, 2012, с. 254-262.
47. **Тахо-Годи А.З.** О методе решения нестационарных волновых задач с помощью численного метода Мусаева В.К. в перемещениях // Безопасность и экология технологических процессов и производств. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Поселок Персиановский Ростовской области: Донской государственный аграрный университет, 2012, с. 73-77.
48. **Куранцов В.А., Денисюк Д.А., Денисенков А.Н., Савичев В.А., Акатьев С.В.** Моделирование нестационарных волн напряжений в деформируемых объектах сложной формы с помощью численного метода Мусаева В.К. в перемещениях // Безопасность и экология технологических процессов и производств. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Поселок Персиановский Ростовской области: Донской государственный аграрный университет, 2012, с. 213-216.
49. **Мусаев В.К.** О безопасности гидротехнических сооружений при чрезвычайных ситуациях природного, техногенного и экологического характера // Безопасность и экология технологических процессов и производств. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Поселок Персиановский Ростовской области: Донской государственный аграрный университет, 2012, с. 237-241.
50. **Мусаев В.К.** Численное моделирование нестационарных волн напряжений в плотине Койна с основанием при волновых сейсмических воздействиях // Безопасность и экология технологических процессов и производств. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Поселок Персиановский Ростовской области: Донской государственный аграрный университет, 2012, с. 245-248.
51. **Мусаев В.К.** Численное моделирование технических средств защиты уникальных объектов от нестационарных сейсмических воздействий // Экология пограничной области. Материалы Международной научной конференции. – Гожув Влкп.–Познань, Польша: Институт научных исследований и экспертиз, 2012, с. 396-407.
52. **Сущев Т.С., Юзбеков Н.С., Ситник В.Г., Тарасенко А.А., Денисюк Д.А.** О применении численного метода Мусаева В.К. в перемещениях для моделирования воздействия плоской продольной волны в виде прямоугольного импульса на упругую полуплоскость // Актуальные проблемы техногенной и экологической безопасности. Сборник научных работ. Выпуск 7. – М.: РГСУ, 2012, с. 439-446.
53. **Сущев Т.С., Ситник С.В., Акатьев С.В., Денисюк Д.А., Зюбина М.В.** О моделировании взаимодействия плоской продольной волны в виде функции Хевисайда на упругую полуплоскость с помощью численного метода Мусаева В.К. в перемещениях // Актуальные проблемы техногенной и экологической безопасности. Сборник научных работ. Выпуск 7. – М.: РГСУ, 2012, с. 447-454.
54. **Сущев Т.С., Юзбеков Н.С., Ситник В.Г., Тарасенко А.А., Денисюк Д.А.** О моделировании интерференции плоских продольных упругих волн напряжений в виде дельта функции с помощью численного метода Мусаева В.К. в перемещениях // Актуальные проблемы техно-

генной и экологической безопасности. Сборник научных работ. Выпуск 7. – М.: РГСУ, 2012, с. 454-462.
55. **Мусаев В.К.** Математическое моделирование системы «сооружение-окружающая среда» на ударные, взрывные и сейсмические воздействия // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – М.: РУДН, 2013, с. 197-200.
56. **Юзбеков Н.С., Сущев Т.С., Ситник С.В., Тарасенко А.А., Зюбина М.В.** Математическое моделирование безопасности сооружений при волновых сейсмических воздействиях с помощью численного метода Мусаева В.К. в перемещениях // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – М.: РУДН, 2013, с. 234-237.
57. **Nemchinov V.V.** Numerical methods for solving flat dynamic elasticity problems // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2013, Volume 9, Issue 1, pp. 90-97.

Мусаев Вячеслав Кадыр оглы – почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры экологического мониторинга и прогнозирования Российского университета дружбы народов; 117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, тел. +7(926) 5670558.
E-mail: musayev-vk@yandex.ru

Musayev Vyacheslav Kadyr ogly, Honorary worker of higher professional education of the Russian Federation, doctor of technical Sciences, Professor, Professor of the chair of ecological monitoring and prognostication of the Russian University of friendship of peoples; 6, st. Miklukho-Maklay, 117198, Moscow, Russia;
tel. +7(926)5670558. E-mail: musayev-vk@yandex.ru

DOI:10.22337/1524-5845-2016-12-3-95-103

О ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ И АПРОБАЦИИ ПОДХОДА К РАСЧЕТУ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОГО МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

О.А. Негрозов[1,2,3], П.А. Акимов[1,2,3,4]

[1] Российская академия архитектуры и строительных наук, г. Москва, РОССИЯ
[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, РОССИЯ
[3] Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, РОССИЯ
[4] ЗАО «Научно-исследовательский центр «СтаДиО», г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: В настоящей статье рассматриваются некоторые особенности программной реализации для апробации (решения простейших тестовых задач) подхода к статическому расчету строительных конструкций, основанному на совместном применении метода конечных элементов (МКЭ) и дискретно-континуального метода конечных элементов (ДКМКЭ), выполняются сопоставления результатов расчета с результатами, найденными с использованием верифицированного программного комплекса промышленного типа ANSYS Mechanical.

Ключевые слова: дискретно-континуальный метод конечных элементов, метод конечных элементов, расчеты строительных конструкций, программная реализация, верификация, апробация

ABOUT SOFTWARE IMPLEMENTATION OF STRUCTURAL ANALYSIS BASED ON COMBINED APPLICATION OF FINITE ELEMENT METHOD AND DISCRETE-CONTINUAL FINITE ELEMENT METHOD

Oleg A. Negrozov[1,2,3], Pavel A. Akimov[1,2,3,4]

[1] Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, RUSSIA
[2] National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA
[3] Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, RUSSIA
[4] Scientific Research Center “StaDyO”, Moscow, RUSSIA

Abstract: The distinctive paper is devoted to several problems of software implementation of structural analysis based on combined application of finite element method (FEM) and discrete-continual finite element method (DCFEM). Simple verification samples are under consideration. Comparison with ANSYS Mechanical solution is presented as well.

Keywords: discrete-continual finite element method, finite element method, structural analysis, structural analysis, software implementation, verification

1. СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДВУМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

1.1. Описание программного комплекса.

Программный комплекс был реализован в среде Visual Studio 2013 Community на языке высокого уровня Fortran стандарта Fortran 2008. Использовался компилятор Intel Parallel Studio 2015XE и библиотека Intel MKL для решения проблем собственных значений и систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Программный комплекс имеет три взаимодействующих модуля [1,2,5-9,10,11,12-14]:

- модуль DCFEM2D – обеспечивает формирование дискретно-континуальной модели конструкции с учетом соответствующих граничных условий (аппроксимация в рамках ДКМКЭ);
- модуль FEM2D – обеспечивает формирование матрицы жесткости и вектора нагрузок в части конструкции, аппроксимируемой конечными элементами (аппроксимация в рамках стандартного МКЭ);
- модуль SOLVER – обеспечивает сборку всех данных, полученных от двух других модулей с учетом условий контакта (как правило, идеальный контакт) с последующим решением разрешающей СЛАУ и выдачей результатов расчета.

Вывод всех промежуточных матриц, векторов, невязок производится в текстовые файлы. Табулированные результаты так же выводятся в текстовые файлы для последующего графического анализа.

1.2. Верификационный пример

Рассматривается балка-стенка, шарнирно опертая по краям (рис. 1). Конструкция разделяется на две части, левая аппроксимируется дискретно-континуальными конечными элементами, правая - конечными элементами. Параметры материала постоянны во всей балке-стенке ($E = 3000$ кН/см^2, $\nu = 0.16$). К балке приложены две сосредоточенные нагрузки P=100 кН.

Результаты расчета сопоставлялись с программным комплексом ANSYS Mechanical. Перемещения и напряжения выводились вдоль выделенной на рис. 1 горизонтальной линии. Для построения графиков была использована программа GOLDENSCENE Grapher.

На графиках (рис. 2-5) наблюдается хорошее соответствие результатов, что говорит о корректном совместном использовании ДКМКЭ и МКЭ. Так же явно выражено преимущество ДКМКЭ в месте приложения сосредоточенной нагрузки, где наблюдается аналитичность вида решения.

2. СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

2.1. Описание программного комплекса.

Программный комплекс был реализован в среде Visual Studio 2013 Community на языке высокого уровня Fortran стандарта Fortran 2008. Использовался компилятор Intel Parallel Studio 2015XE и библиотека Intel MKL для решения проблем собственных значений и систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Программный комплекс имеет три взаимодействующих модуля [3,4,8,9,10,11,15]:

- модуль DCFEM3D – обеспечивает формирование дискретно-континуальной модели конструкции с учетом соответствующих граничных условий (аппроксимация в рамках ДКМКЭ);
- модуль FEM3D – обеспечивает формирование матрицы жесткости и вектора нагрузок в части конструкции, аппроксимируемой конечными элементами (аппроксимация в рамках стандартного МКЭ);
- модуль SOLVER – обеспечивает сборку всех данных, полученных от двух других модулей с учетом условий контакта (как правило, идеальный контакт) с последующим решением разрешающей СЛАУ и выдачей результатов расчета.

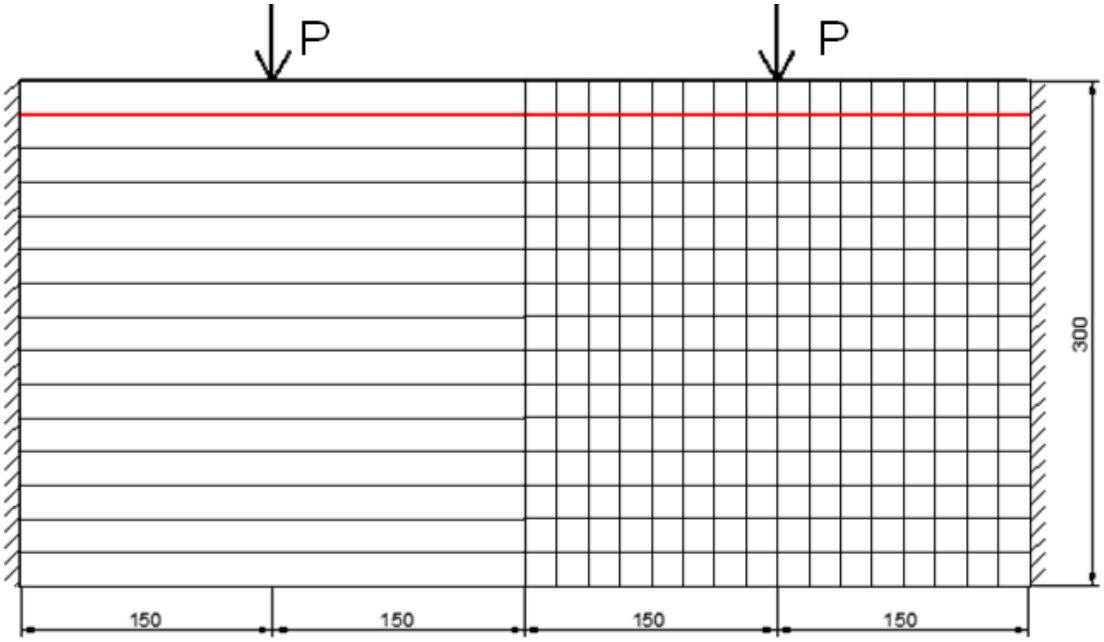


Рисунок 1. Расчетная схема (тестовый пример №1).

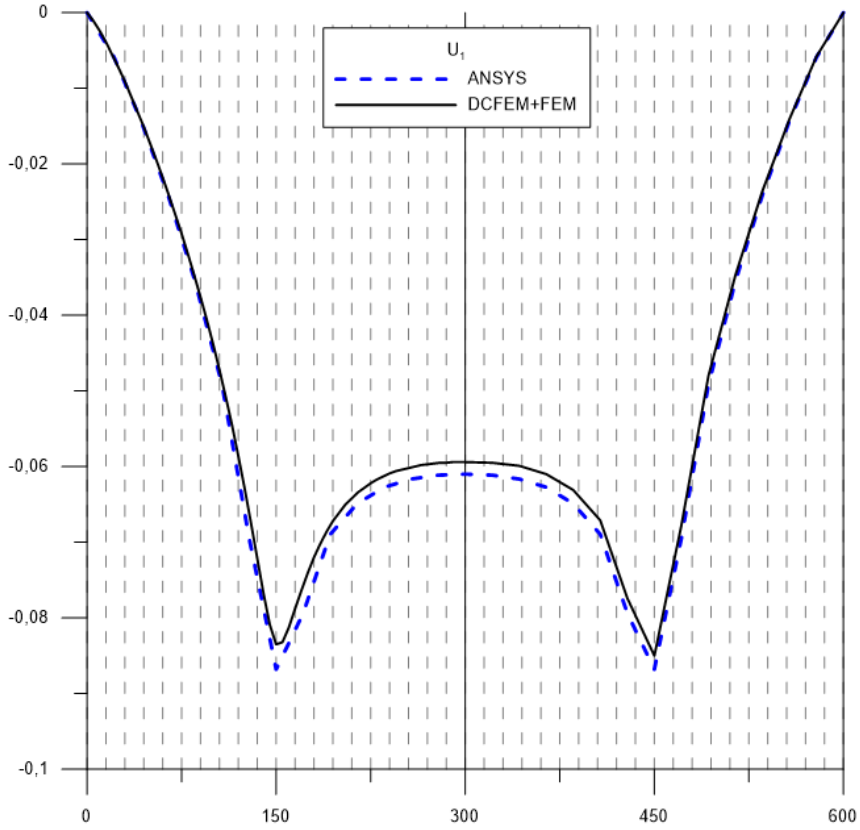


Рисунок 2. Перемещения вдоль оси Ox_1, см.

Вывод всех промежуточных матриц, векторов, невязок производится в текстовые файлы. Табулированные результаты так же выводятся в текстовые файлы для последующего графического анализа.

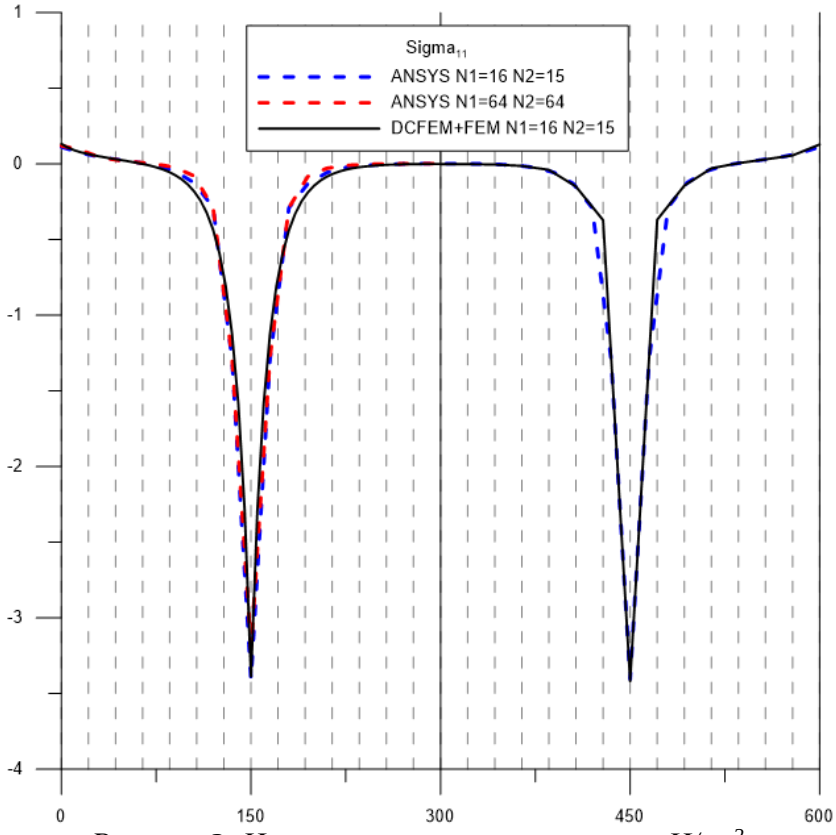


Рисунок 3. Нормальные напряжения σ_{11}, кН/см^2.

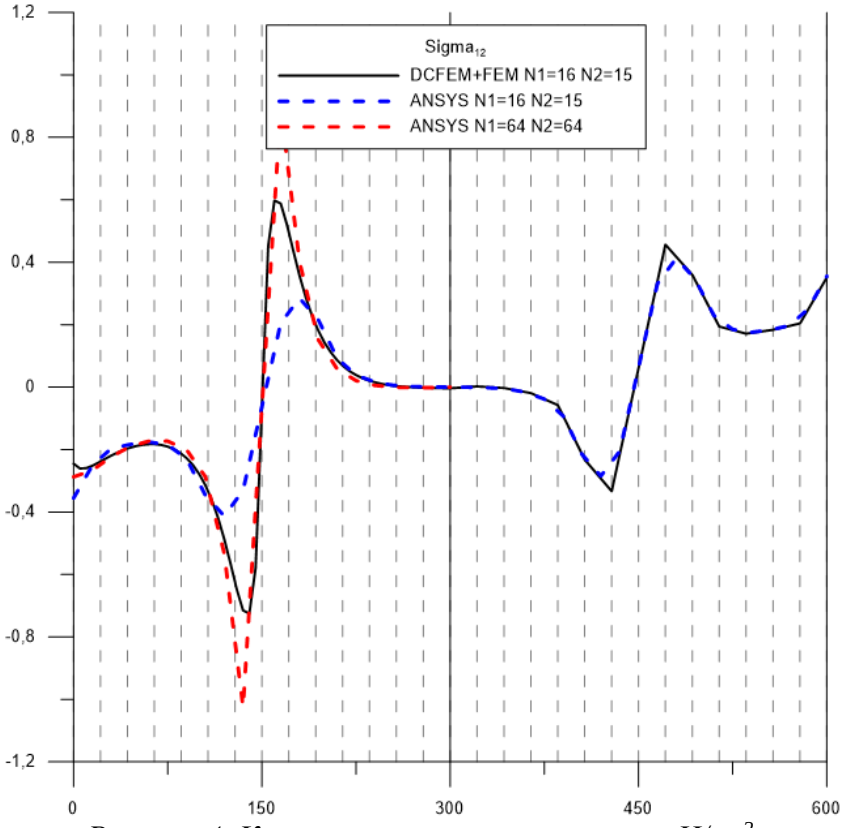


Рисунок 4. Касательные напряжения σ_{12}, кН/см^2.

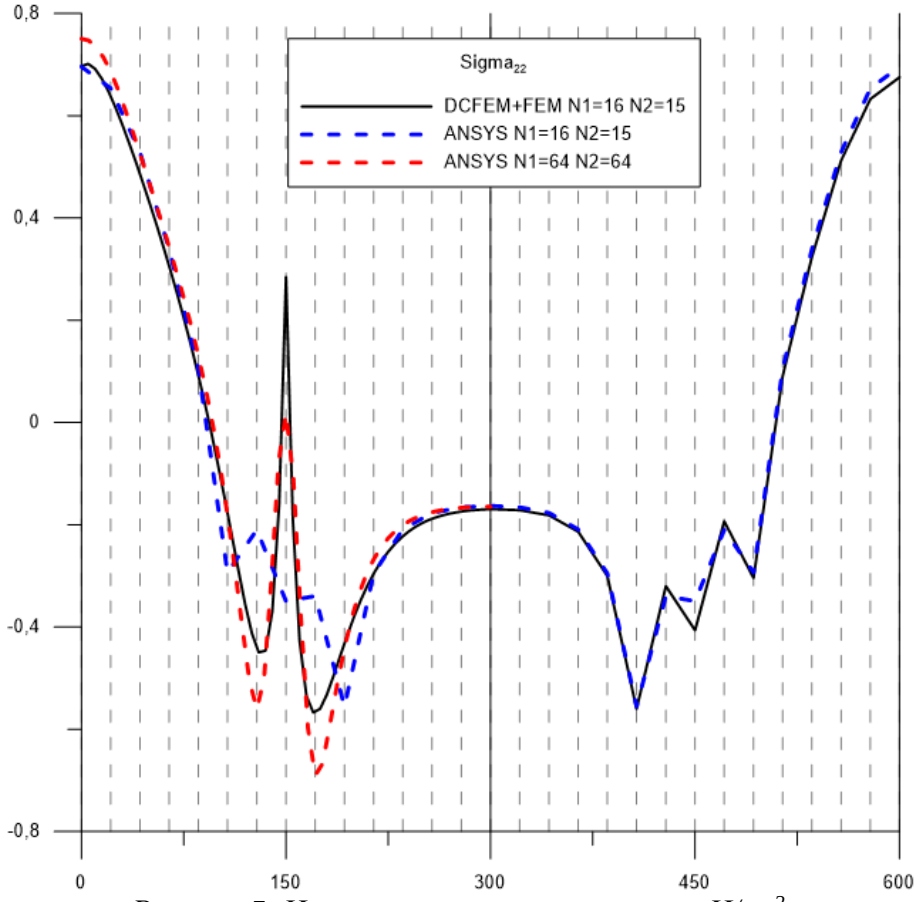


Рисунок 5. Нормальные напряжения σ_{22}, кН/см^2.

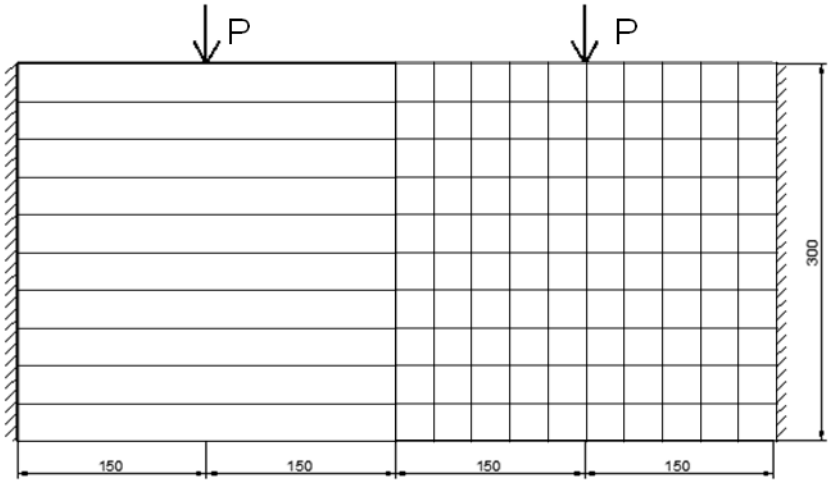


Рисунок 6. Расчетная схема (тестовый пример №2).

2.2. Верификационный пример

Рассматривается трехмерный брус, шарнирно опертый по краям (см. рис. 6,7). Сечение брусу изображено на рис. 7. Конструкция разделяется на две части, левая аппроксимируется дискретно-континуальными конечными элементами (в рамках ДКМКЭ), правая – конечными элементами (в рамках стандартного МКЭ).

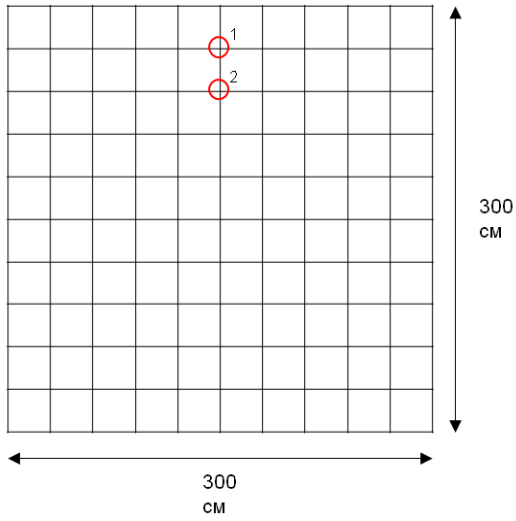


Рисунок 7. Поперечное сечение бруса. Узлы вывода результатов.

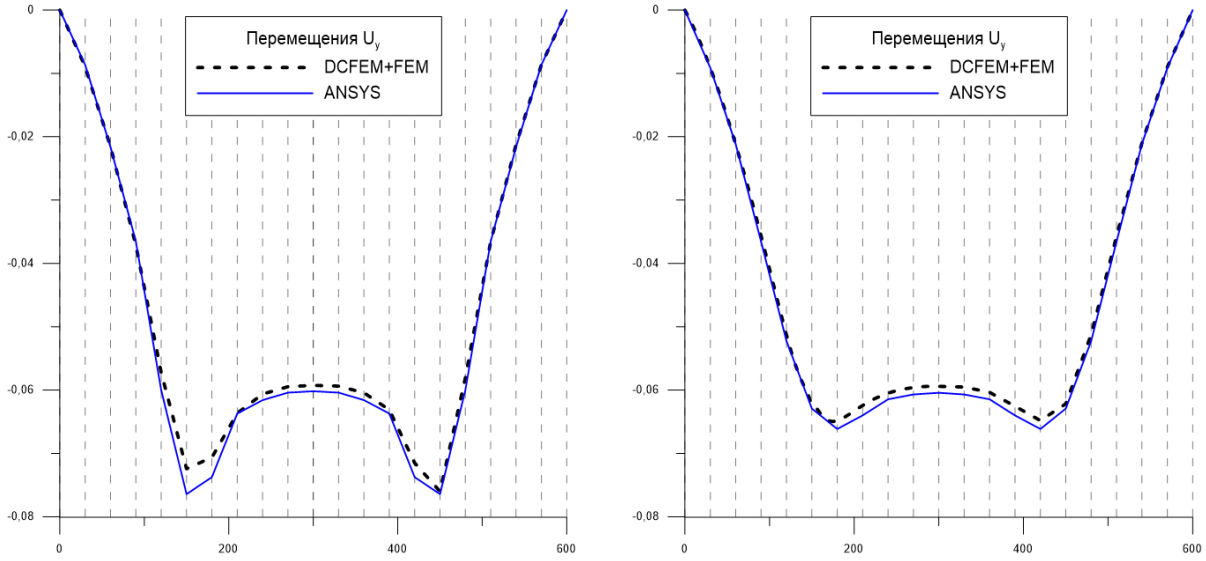


Рисунок 8. Перемещения вдоль оси Ox_2, см.

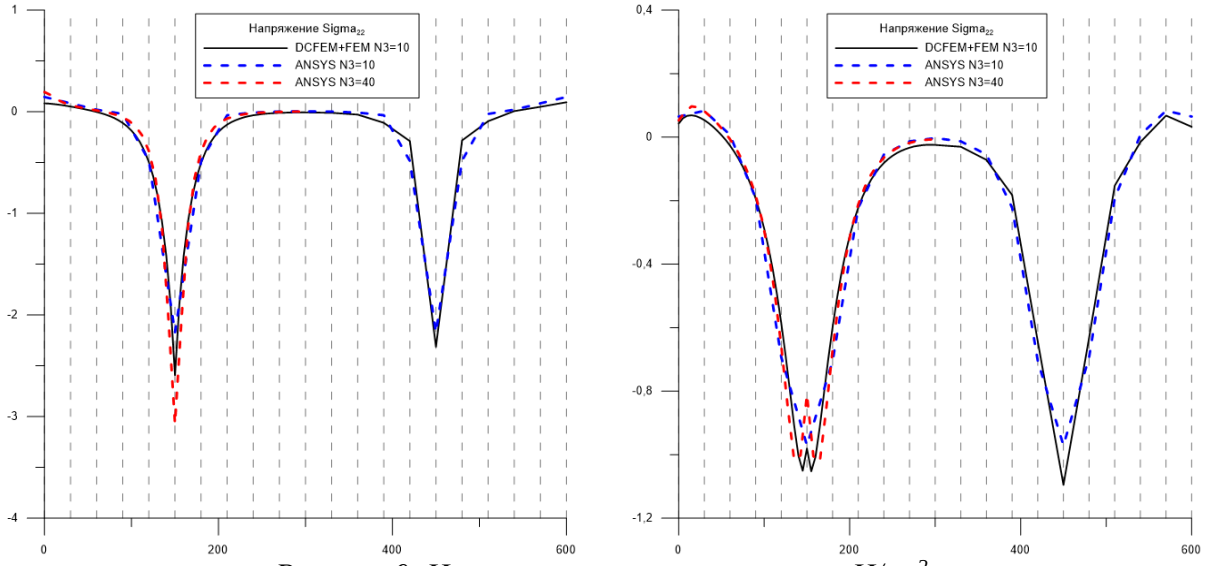


Рисунок 9. Нормальные напряжения σ_{22}, кН/см^2.

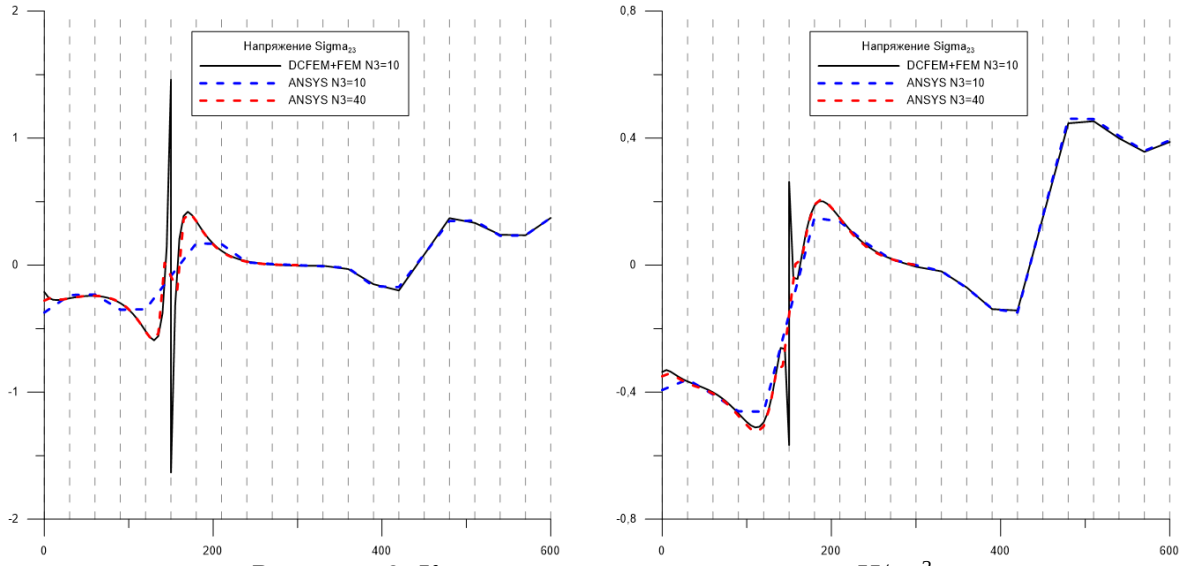


Рисунок 10. Касательные напряжения σ_{23}, кН/см^2.

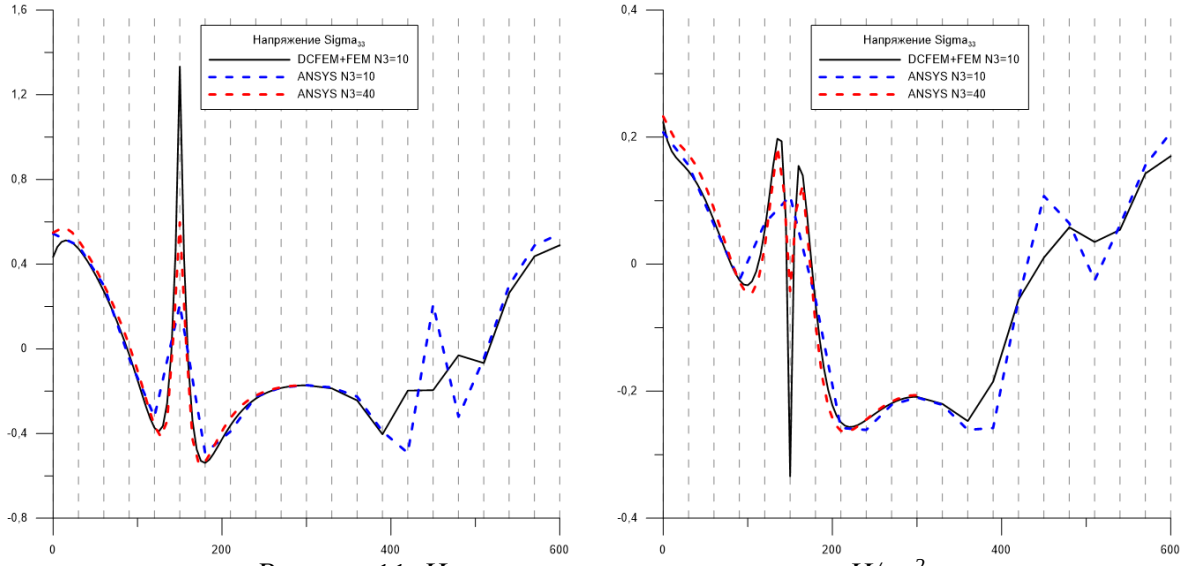


Рисунок 11. Нормальные напряжения σ_{33}, кН/см^2.

ЗАМЕЧАНИЕ

Исследование выполнено за счет средств Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы в рамках Плана фундаментальных научных исследований Министерства строительства и жилищно-коммунального строительства Российской Федерации на 2016 год, тема 7.1.1 «Разработка многоуровневого подхода к исследованию напряженно-деформированного состояния конструкций в рамках единой иерархически выстроенной расчетной модели на основе совместного применения дискретно-континуального метода конечных элементов и метода конечных элементов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акимов П.А., Мозгалева М.Л., Моджтаба Аслами, Негрозов О.А., Щербина С.В.** О верификации дискретно-континуального метода конечных элементов для задач статического расче-

та балок-стенок с кусочно-постоянными физико-геометрическими параметрами вдоль основного направления. Сопоставления с программным комплексом ANSYS Mechanical. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume10,Issue 1,2014, pp. 33-45.

2. **Акимов П.А., Мозгалева М.Л., Моджтаба Аслами, Негрозов О.А., Щербина С.В.** О верификации дискретно-континуального метода конечных элементов для задач статического расчета балок-стенок с постоянными физико-геометрическими параметрами вдоль основного направления. Сопоставления с программным комплексом ANSYS Mechanical. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 10, Issue 1, 2014, pp. 18-32.
3. **Акимов П.А., Мозгалева М.Л., Сидоров В.Н.** Некоторые алгоритмические особенности, связанные с использованием нерегулярных аппроксимирующих сеток при численном решении трехмерных краевых задач расчета конструкций в рамках дискретно-континуального метода конечных элементов. Часть 1: Дискретно-континуальная постановка задачи. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 9, Issue 4, 2013, pp. 44-63.
4. **Акимов П.А., Мозгалева М.Л., Сидоров В.Н.** Некоторые алгоритмические особенности, связанные с использованием нерегулярных аппроксимирующих сеток при численном решении трехмерных краевых задач расчета конструкций в рамках дискретно-континуального метода конечных элементов. Часть 2: Алгоритм задания стандартных типов граничных условий. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 9, Issue 4, 2013, pp. 64-82.
5. **Акимов П.А., Мозгалева М.Л., Сидоров В.Н.** Об одном корректном варианте реализации дискретно-континуального метода конечных элементов для решения задач статического расчета балок-стенок. Часть 1: Континуальные постановки задачи. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 9, Issue 2, 2013, pp. 51-55.
6. **Акимов П.А., Мозгалева М.Л., Сидоров В.Н.** Об одном корректном варианте реализации дискретно-континуального метода конечных элементов для решения задач статического расчета балок-стенок. Часть 2: Численная реализация метода. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 9, Issue 2, 2013, pp. 56-79.
7. **Акимов П.А., Мозгалева М.Л., Сидоров В.Н.** Об одном корректном варианте реализации дискретно-континуального метода конечных элементов для решения задач статического расчета балок-стенок. Часть 3: Программная реализация и примеры расчетов. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 9, Issue 2, 2013, pp. 80-97.
8. **Мозгалева М.Л., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Кайтуков Т.Б.** О некоторых особенностях реализации корректного метода точного аналитического решения двухточечных краевых задач строительной механики для систем обыкновенных дифференциальных уравнений. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 10, Issue 1, 2014, pp. 120-122.
9. **Akimov P.A.** Correct Discrete-Continual Finite Element Method of Structural Analysis Based on Precise Analytical Solutions of Resulting Multipoint Boundary Problems for Systems of Ordinary Differential Equations. // Applied Mechanics and Materials Vols. 204-208 (2012), pp. 4502-4505.
10. **Akimov P.A., Belostotskiy A.M., Mozgaleva M.L., Mojtaba Aslami, Negrozov O.A.** Correct Multilevel Discrete-Continual Finite Element Method of Structural Analy-

sis. // Advanced Materials Research Vol. 1040 (2014), pp. 664-669.
11. **Akimov P.A., Mozgaleva M.L.** Method of Extended Domain and General Principles of Mesh Approximation for Boundary Problems of Structural Analysis. // Applied Mechanics and Materials, Vols. 580-583 (2014), pp. 2898-2902.
12. **Akimov P.A., Mozgaleva M.L., Mojtaba Aslami, Negrozov O.A.** About Verification of Discrete-Continual Finite Element Method of Structural Analysis. Part 1: Two-Dimensional Problems // Procedia Engineering, Vol. 91 (2014), pp. 2-7.
13. **Akimov P.A., Mozgaleva M.L., Negrozov O.A.** About Verification of Discrete-Continual Finite Element Method for Two-Dimensional Problems of Structural Analysis. Part 1: Deep Beam with Constant Physical and Geometrical Parameters Along Basic Direction. // Advanced Materials Research, Vols. 1025-1026 (2014), pp. 89-94.
14. **Akimov P.A., Mozgaleva M.L., Negrozov O.A.** About Verification of Discrete-Continual Finite Element Method for Two-Dimensional Problems of Structural Analysis. Part 2: Deep Beam with Piecewise Constant Physical and Geometrical Parameters Along Basic Direction. // Advanced Materials Research, Vols. 1025-1026 (2014), pp. 95-103.
15. **Akimov P.A., Mozgaleva M.L., Sidorov V.N.** About Verification of Discrete-Continual Finite Element Method of Structural Analysis. Part 2: Three-Dimensional Problems // Procedia Engineering, Vol. 91 (2014), pp.14-19.

Акимов Павел Алексеевич, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук; Главный ученый секретарь РААСН; заместитель генерального директора по науке ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО», профессор кафедры прикладной математики Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ); 107031, г. Москва, ул. Большая Дмитровка, д. 24, стр. 1; тел. +7(495) 625-71-63; факс +7 (495) 650-27-31; e-mail: akimov@raasn.ru, pavel.akimov@gmail.com.

Негрозов Олег Александрович, аспирант кафедры прикладной математики, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; тел/факс: +7 (499) 183-59-94; e-mail: NegrozovOA@mgsu.ru

Pavel A. Akimov, Corresponding Member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, PhD, Professor, Chief Scientific Secretary of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; StaDyO Research & Engineering Center; Department of Applied Mathematics, Moscow State University of Civil Engineering; 24, Ul. Bolshaya Dmitrovka, 107031, Moscow, Russia; phone +7(495) 625-71-63; fax: +7 (495) 650-27-31; e-mail: akimov@raasn.ru, pavel.akimov@gmail.com.

Oleg A. Negrozov, PhD Student, Department of Applied Mathematics, Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia, phone/fax: +7(499) 183-59-94, e-mail: NegrozovOA@mgsu.ru

DOI:10.22337/1524-5845-2016-12-3-104-113

СОПОСТАВЛЕНИЕ КОНКУРИРУЮЩИХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

А.В. Перельмутер
НПО «СКАД Софт», г. Киев, УКРАИНА

Аннотация: Указывается на важность выполнения расчетов сложных и ответственных сооружения по конкурирующим расчетным моделям, реализованных в независимых программных разработках. Предлагаются приемы сопоставления результатов расчета, выполненных по конкурирующим расчетным моделям. Они основаны на специальной нормировке внутренних усилий по параметрам несущей способности элементов и на использовании методов корреляционного анализа. Приводятся иллюстративные примеры.

Ключевые слова: расчетная модель, результаты расчета, коэффициент корреляции

COMPARISON OF COMPETING RESULTS OF THE CALCULATION

Anatolii V. Perelmuter
SCAD Soft, Ltd, Kiev, UKRAINE

Abstract: This paper shows the importance of performing the calculations of complex and important structures for competing design models generated in independent programs. Techniques for comparing the results of the calculation performed for competing design model are suggested. They are based on the special normalization of internal forces for the parameters of load-bearing capacity of the elements and on the use of the correlation analysis methods. Illustrative examples are provided.

Key words: design model, results of the calculation, correlation coefficient

1. СУЩЕСТВО ПРОБЛЕМЫ

Опыт проектной работы последних десятилетий показывает, что развитие средств автоматизации инженерных расчетов оказывает самое серьезное (увы, как положительное, так и отрицательное) воздействие на качество расчетных обоснований проектных решений. Тот уровень детальности и точности расчета, который сегодня доступен проектировщикам в массовом порядке, вчера еще был недостижим даже для наиболее квалифицированных организаций и специалистов. Вместе с тем массовая доступность современных мощных расчетных вычислительных комплексов создает и целый ряд новых проблем.

Одной из них является методика сопоставления результатов расчета, которые для повышения качества расчетных обоснований проектных решений выполняются не менее чем по двум сертифицированным, независимо разработанным и проверенным в практике программным комплексам [1].

Другое в том, что области применения различных программных систем, как правило, пересекаются, но не совпадают. Так, например, в различных расчетных программах могут быть реализованы различные варианты теории оболочек.

Следует также отметить, что насыщение библиотек конечных элементов оказывается различным в разных программных комплексах, при этом внешне похожие элементы, изображение которых на расчетных схемах одинаковы, могут иметь сильно отличающееся «наполнение».

Итак, стандартной становится ситуация, когда имеется как минимум два массива результатов расчета и возникает задача об их сопоставлении и выработке мнения о схожести этих результатов. Аналогичная проблема возникает и при сопоставлении результатов расчета с экспериментальными данными [2], при анализе результатов мониторинга [3, 4, 5] или же в процессе верификации программной системы. У этой проблемы есть следующие составляющие:

- какие параметры поведения конструкции следует анализировать;
- каким способом выполняется сопоставление данных;
- какова мера, с использованием которой принимается решение об удовлетворительном (не удовлетворительном) результате сопоставления.

Заметим, что общепринятая норма схожести в виде пятипроцентного расхождения также должна быть конкретизирована, в частности необходимо уточнить к каким результатам (перемещения, усилия и т.п.) и к каким значениям (экстремальные, средние или другие) она должна относиться.

2. ЧТО СОПОСТАВЛЯТЬ

Выбор параметров подлежащих сопоставлению определяется их значимостью, доступностью для получения (измерения) и тем, насколько представительно они определяют то, что мы неформально называем «поведение системы». Этот выбор существенно зависит от целей сопоставительного анализа и для определенности в дальнейшем мы будем говорить о сравнении двух расчетных моделей с целью выяснения их близости и обоснования возможности их использования при расчете одного и того же объекта.

По-видимому, не существует общих методов выбора таких параметров, их набор очень сильно зависит от вида рассматриваемой конструкции и его формализация практически не возможна.

Правда, имеются некоторые традиционные предпочтения, к числу которых относится выбор экстремальных внутренних усилий или перемещений, а также анализ частот и форм собственных колебаний.

Но первые зачастую не характеризуют общую картину напряженно-деформированного состояния, а вторые, будучи интегральными характеристиками системы, часто являются слишком нечувствительными даже к сильным локальным различиям [3].

Отсюда вытекает первый вывод: необходимо использовать набор разнообразных параметров поведения системы и только их совместный анализ позволяет прийти к убедительным результатам.

Кроме того следует иметь в виду, что даже прекрасное совпадение результатов расчета по одному варианту нагружения системы ничего не говорит о близости сравниваемых расчетных схем. Поэтому нужно помнить, что сопоставление расчетных моделей можно полагать убедительным лишь при сравнении результатов расчета системы при различных вариантах нагружения.

3. СРАВНЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ НДС. ЗНАЧИМОСТЬ РАСХОЖДЕНИЙ

Следует иметь некоторую меру, с использованием которой принимается решение об удовлетворительном (не удовлетворительном) результате сопоставления. Ведь в инженерно-технических расчетах полного совпадения результатов не бывает. Общепринятая норма схожести в виде пятипроцентного расхождения также должна быть конкретизирована, и необходимо уточнить к каким результатам (перемещения, усилия и т.п.) и к каким значениям (экстремальные, средние или другие) она должна относиться. Ведь трудно себе представить, что с пятипроцентной точностью будут совпадать результаты, чьи значения близки к нулю.

В связи с этим большое значение придавалось методике сопоставления результатов.

Несовпадение результатов расчета оценивается различным способом в зависимости от целей оценки. В простейшем случае нас может интересовать, как наблюдаемые расхождения сказываются на суждении о прочности исследуемой конструкции.

Вместо обычно используемой оценки расхождения

$$\Delta_X = \frac{X^{(1)} - X^{(2)}}{X^{(1)}} \times 100\,(\%) \qquad (1)$$

логично сопоставлять усилия и моменты следующим способом

$$\Delta_{0N} = \frac{N^{(1)} - N^{(2)}}{AR_d} \times 100\,(\%),$$
$$\Delta_{0M} = \frac{M^{(1)} - M^{(2)}}{WR_d} \times 100\,(\%). \qquad (2)$$

Иными словами, разницу результатов следует соотносить с несущей способностью соответствующего элемента.

Тогда расхождения становятся физически значимыми, а не формальными. Их значения позволяют судить о влиянии неточности на результат расчетных проверок, как видно из приведенной ниже таблицы, когда оказывается, что расхождение на 18,4% с точки зрения значимости абсолютно ничтожно.

N_1	N_2	Δ_N, %	Δ_{0N}, %
-220,0	-222,4	1,073	0,166
-14,9	-12,1	18,403	0,262
-460,9	-462,2	0,281	0,168
61,7	58,7	4,891	0,181
-56,8	-53,6	5,582	0,380
2,3	2,1	9,582	0,031

В качестве примера рассмотрим поперечник производственного здания, традиционная схема которого представлена на рис. 1.*а* Традиционность заключается в повсеместно используемом положении о жестком защемлении колонн в основании.

Проанализируем, как влияет на напряженное состояние колонн учет податливости основания (рис. 1.*б*). Для этого предположим, что винклеровский коэффициент постели грунтового основания C=800 т/м^3, а размеры подошвы фундамента равны 3×1,5 м. Площадь подошвы и ее момент инерции $A_{кр}$ = 4,5 м^2 , $I_{кр}$ = 3,375 м^4.

Тогда коэффициенты жесткости относительно осадки фундамента – K_z = 4,5×800 = 3600 т/м; горизонтального смещения фундамента – K_x = 0,7×3600 = 2520 т/м; поворота фундамента – K_φ = 2×3,375×800 = 5400 тм/рад;

Расчет обоих вариантов расчетной схемы выполнен на три нагружения: 1 – равномерно распределенная по кровле; 2 – торможение крана; 3 – нагрев на 80°С.

Полученные в результате расчета эпюры моментов в колоннах показаны на рис. 2-4.

Видно как заметно влияет учет податливости основания на результат, в особенности это сказывается при анализе поведения конструкции при температурном нагружении. Здесь возможность горизонтальной подвижки фундамента практически снимает изгиб колонн. Этот эффект объясняет тот факт, что расчет жестко защемленного каркаса на температурное воздействие, когда блоки разделены температурными швами в соответствии с рекомендациями норм проектирования, часто показывает значительные перенапряжения, хотя опыт эксплуатации свидетельствует о полном отсутствии каких бы то ни было проблем.

Однако насколько значимыми являются различия в результатах расчета можно проверить лишь используя сопоставления типа (2).

Подкрановая часть колонны выполнена из двутавра 90БС2, момент сопротивления, которого W=11047 см^3, надкрановая часть — из двутавра 40К2 у которого W=3207 см^3. Расчетное сопротивление R_y=2100 см^2. Результаты подсчетов сведены в таблицу 1.

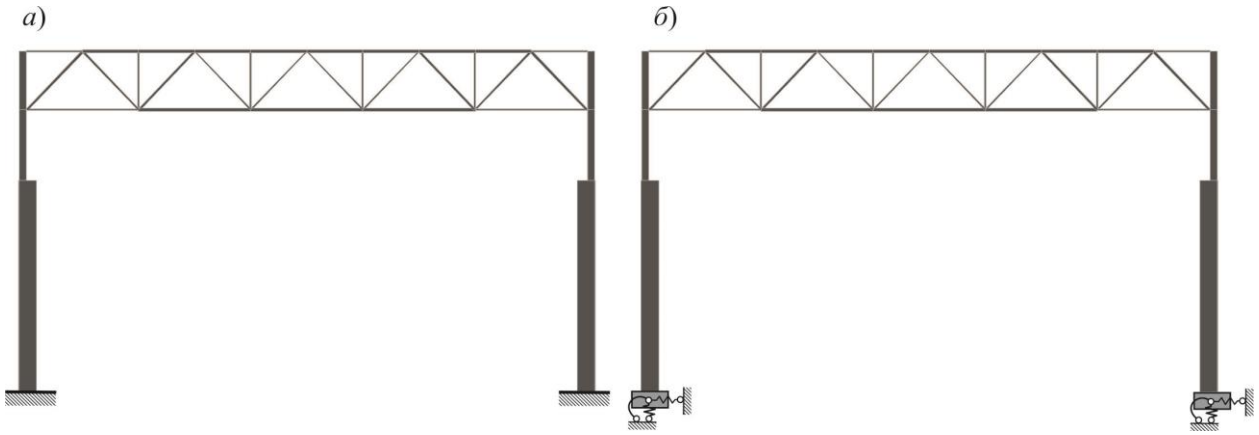


Рисунок 1. Расчетная схема.

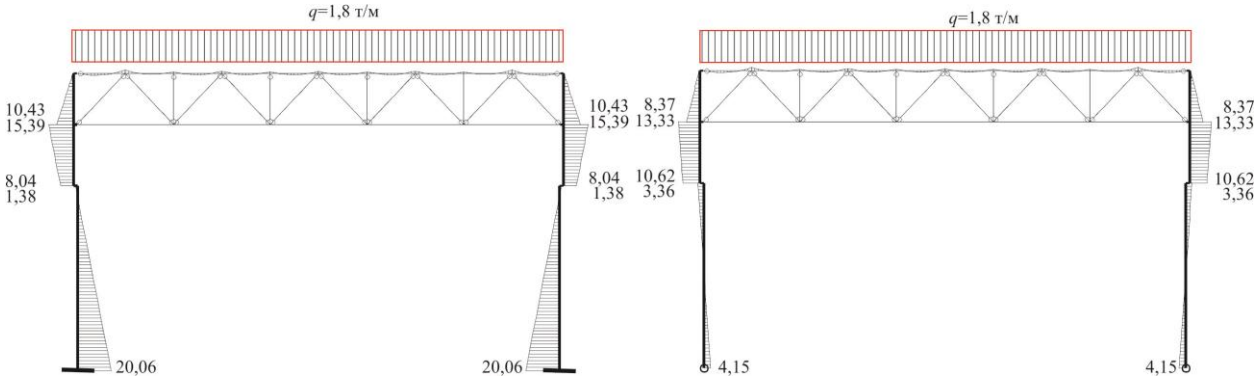


Рисунок 2. Эпюра моментов (нагружение 1).

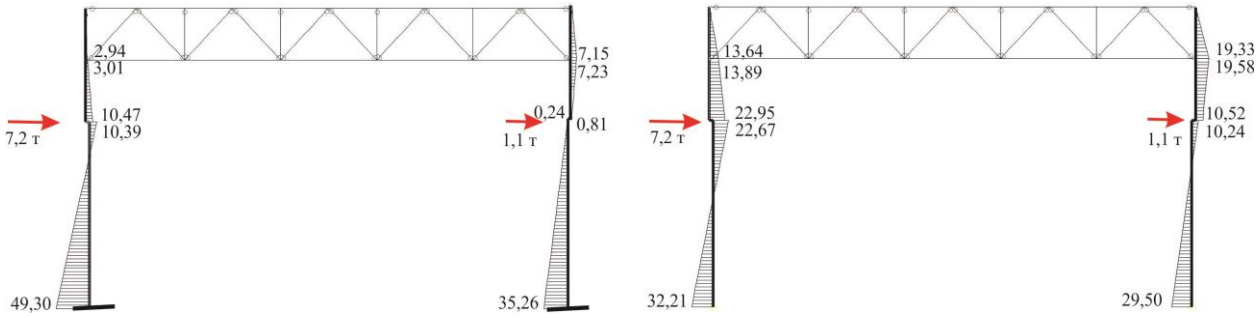


Рисунок 3. Эпюра моментов (нагружение 2).

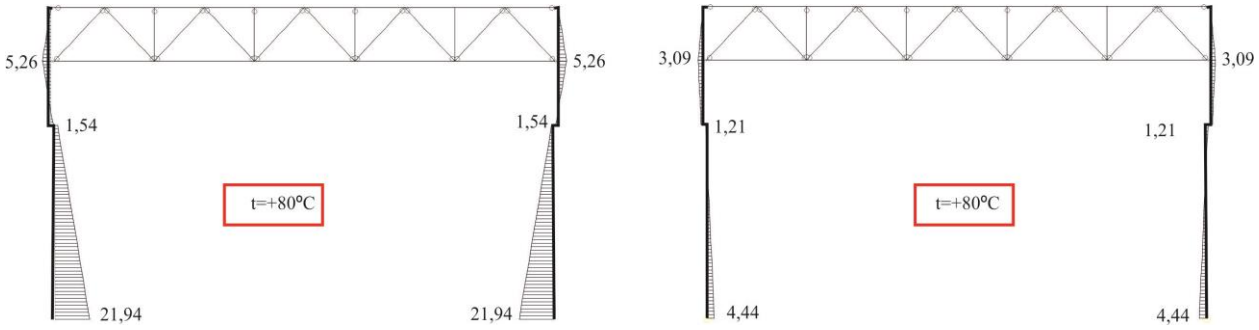


Рисунок 4. Эпюра моментов (нагружение 3).

Таблица 1. Результаты расчетов.

Колонна	W см^3	Разность моментов (тм) по загружениям:			Взвешенные разности по загружениям:		
		1	2	3	1	2	3
Левая	11047	12,028	10,116	17,123	0,052	0,044	0,074
		3,000	3,646	4,27	0,013	0,016	0,018
	3207	3,000	3,671	4,27	0,045	0,055	0,063
		0,009	1,515	0,014	0,000	0,022	0,000
Правая	11047	12,028	7,116	17,123	0,052	0,031	0,074
		3,000	0,646	4,27	0,013	0,003	0,018
	3207	3,000	0,621	4,27	0,045	0,009	0,063
		0,009	1,536	0,014	0,000	0,023	0,000
Среднее		4,509	3,608	6,419	0,027	0,025	0,038

4. СОПОСТАВЛЕНИЕ ЧАСТОТ И ФОРМ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Частоты и формы собственных колебаний сравниваемых расчетных моделей являются едва ли не самыми информативными данными интегрирующие многие факторы и параметры расчетных моделей. Их также используют при сопоставлении результатов расчета с наблюдаемыми в натуре или измеренными на специальной механической модели [3,4] результатами.

Различие частот собственных колебаний можно определить как

$$\Delta\omega_j = \frac{2\left\lfloor \omega_j^{(1)} - \omega_j^{(2)} \right\rfloor}{\left[\omega_j^{(1)} + \omega_j^{(2)} \right]} \quad . \qquad (3)$$
$$\left(j = 1,2,...,m \right)$$

Здесь отсутствует некоторый естественный масштаб сравнения, поэтому разность частот отнесена к среднеарифметическому сопоставляемых величин.

Более сложно обстоит дело при сопоставлении форм собственных колебаний. Поскольку формы определяются с точность до произвольного множителя, простое сопоставление n компонентов каждой из m форм

$$Z_{ij}^{(1)} \leftrightarrow Z_{ij}^{(2)}$$
$$\left(i = 1,...,n;\ j = 1,2,...,m \right) \qquad (4)$$

ни о чем не говорит. Учитывая, что умноженная на некоторый коэффициент форма остается формой собственных колебаний, было предложено [4] оценивают разность $kZ_{ij}^{(1)} - Z_{ij}^{(2)}$, подбирая при этом значение множителя k из условия минимизации суммы квадратов отклонений

$$\min_k \sum_{i=1}^{n} \left(kZ_{ij}^{(1)} - Z_{ij}^{(2)} \right)^2 . \qquad (5)$$

Но возможен и другой вариант решения этой задачи. Поскольку предполагается, что векторы $\bar{\mathbf{Z}}_j^{(1)}$ и $\bar{\mathbf{Z}}_j^{(2)}$ относятся к одной и той же системе, то логично предположить, что между ними существует некоторая взаимная зависимость. Следовательно, можно вычислять коэффициенты корреляции ρ_j которые, как известно [6], оценивают существование такой зависимости линейного типа и ее близость к точной функциональной связи между сопоставляемыми величинами. Вычисления выполняются с помощью формулы:

$$\rho_j = \frac{n\sum_{i=1}^{n} Z_{ij}^{(1)} Z_{ij}^{(2)} - \sum_{i=1}^{n} Z_{ij}^{(1)} \sum_{i=1}^{n} Z_{ij}^{(2)}}{\sqrt{\left[n\sum_{i=1}^{n}\left(Z_{ij}^{(1)}\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} Z_{ij}^{(1)}\right)^2\right]\left[n\sum_{i=1}^{n}\left(Z_{ij}^{(2)}\right)^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} Z_{ij}^{(2)}\right)^2\right]}}, \quad (6)$$

Чем ближе по абсолютной величине величина ρ к единице, тем точнее линейная зависимость между векторами $\bar{\mathbf{Z}}_j^{(1)}$ и $\bar{\mathbf{Z}}_j^{(2)}$.

В качестве примера рассмотрим задачу, приведенную на странице 151 книги [7]. Схема рассмотренной там рамной конструкции приведена на рис. 5. Все стержни этой конструкции имеют двутавровое сечение с полками 200×16 мм и стенкой 700×10 мм.

Сопоставим найденные в [7] собственные векторы, которые записаны как столбцы матрицы собственных форм $\mathbf{Z}^{(1)}$ с решением той же задачи, найденным с помощью ВК СКАД, которое представлено матрицей собственных форм $\mathbf{Z}^{(2)}$.

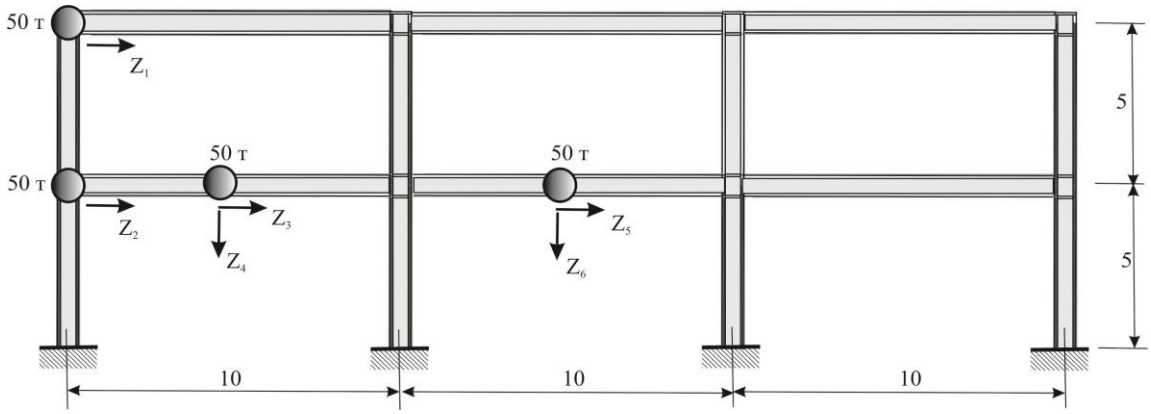


Рисунок 5. Пример на сравнение собственных форм.

$\mathbf{Z}^{(1)}=$

1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,5441	0,3188	1,0480	-0,6702	12,8061	-88,2889
0,5420	0,4773	1,2536	-0,6554	4,2445	117,9442
-0,0435	40,3686	65,5252	0,0062	0,1176	-0,1990
0,5262	0,5548	1,5383	-0,5312	-19,5101	-32,2418
-0,0010	-36,0105	76,8957	0,0119	0,0288	0,0899

$\mathbf{Z}^{(2)}=$

1000	24,756	13,66	1000	-48,748	7,877
544,12	8,264	13,239	-667,192	-660,611	-747,224
542,685	11,892	15,717	-652,714	-220,124	1000
-43,522	1000	891,845	5,483	-5,563	-1,562
527,414	13,64	19,184	-535,639	1000	-273,124
-0,696	-892,741	1000	10,818	-1,352	0,7

Отличие здесь состоит в том, что решение из [7] найдено в предположении абсолютной жесткости стержней на растяжение/сжатие, в то время как в СКАД эта гипотеза не использовалась.

Коэффициенты корреляции, вычисленные по формуле (6), равны:

ρ_1=1,0000; ρ_2=1,0000; ρ_3=0,9996;
ρ_4=0,9999; ρ_5=-0,9999; ρ_6=1,0000.

5. ГРУППОВЫЕ СРАВНЕНИЯ

В некоторых случаях целью сопоставления является не оценка «ошибки» от замены одной расчетной моделью другой, а сравнение расчетных моделей в более общем смысле. И здесь следует учитывать, что указанные выше сопоставления результатов расчета производятся при вполне определенном виде нагружения на систему и близость результатов, установленная при одном нагружении, может не подтвердиться при другом. Отсюда следует, что при более общем сравнении результаты должны относиться к серии характерных режимов работы конструкции.

Пусть сопоставляются две модели *A* и *B*, для которых выполнены расчеты по *m* вариантам нагружения и получены значения *n* внутренних усилий. Иными словами имеются две матрицы $\lfloor X_{ij}^A \rfloor, \lfloor X_{ij}^B \rfloor$, в ячейках которых записаны значения *i*-го (i=1,…,n) параметра напряженно-деформированного состояния (НДС), вычисленного в *j*-м (j=1,…,m) нагружении.

Строка такой матрицы характеризует характер изменения рассматриваемого параметра НДС при изменении режима работы (варианта нагружения). А в случае достаточно представительного набора параметров НДС столбец матрицы характеризует картину поведения системы под определенной нагрузкой. Естественно, что можно говорить о сходстве или различии расчетных моделей *A* и *B* лишь в случае обоих видов сходства.

Для этого требуется вычислить два набора коэффициентов корреляции. Сопоставление столбцов, выражаемое значением коэффициентов корреляции ρ_j между сравниваемыми векторами, дает сведения о влиянии различия моделей на сходство (различие) общей картины напряженно-деформированного состояния (НДС) в том или ином режиме работы конструкции. Сопоставление строк и значение соответствующего коэффициента корреляции ρ_i указывает на сходство (различие) реакции того или иного параметра НДС на изменение характера нагружения.

Заметим, что выбор вариантов тестовых нагружений и выбор контролируемых параметров не формализуем. Он должен осуществляться с учетом особенностей рассматриваемой задачи, но в конце-концов является в некоторой мере случайным, поскольку представляет собой некоторое подмножество более или менее удачно выделенное из неопределенного числа возможных вариантов. В силу сказанного к полученным значениям $\lfloor X_{ij}^A \rfloor, \lfloor X_{ij}^B \rfloor$ можно относиться как к случайным величинам, что и наталкивает на идею применения методов корреляционного анализа.

Близость абсолютных значений ρ_j и ρ_i к единице свидетельствуют об общем сходстве сравниваемых моделей. Если же коэффициент корреляции заметно отходит от единичного значения, то это указывает на особую роль соответствующей оценки (критичность нагружения или чувствительность элемента). Здесь однако следует понимать, что ситуация несколько отличается от случая сопоставления форм собственных колебаний. Дело в том, что близость коэффициента ρ_j к единице говорит о сходстве лишь в смысле выполнения равенства

$$X_{ij}^A = CX_{ij}^B \quad (i = 1,...,n) \tag{7}$$

с некоторой неизвестной константой *C*. Но в отличие от случая собственных форм значение параметра НДС после умножение на константу перестает быть решением задачи.

Поэтому анализ должен быть дополнен рассмотрением отношений

$$c_j = 2\sum_{i=1}^{n} \left(X_{ij}^A - X_{ij}^B\right) / \left(X_{ij}^A + X_{ij}^B\right) \tag{8}$$

и лишь в том случае, когда все c_j являются пренебрежимо малыми величинами можно говорить о сходстве рассматриваемых расчетных моделей.

В качестве примера приведем данные о сопоставлении результатов по двум вариантам расчетной модели, которые представлены в матрицах **X** и **Y**.

X=

-15,79	-0,46	32,72
-24,15	1,52	38,76
-66,24	1,11	39,66
-66,24	1,11	39,66
-67,67	-14,69	56,22
-100,73	-10,18	42,61
-105,50	-11,70	43,29
-54,52	1,19	17,25
-33,73	-1,09	-11,58
32,59	-0,59	3,29
0,08	-4,63	12,64
2,87	0,42	0,91
2,88	0,42	0,92
9,73	-2,47	2,79
0,01	0,03	2,05
2,36	3,54	6,87

Y=

-15,85	-0,27	147,24
-24,04	1,63	174,42
-66,45	1,16	178,47
-66,45	1,16	178,47
-68,86	-14,38	252,99
-101,47	-10,24	191,745
-106,29	-11,72	194,805
-54,90	1,07	104,625
-33,98	-1,15	7,11
32,81	-0,52	14,805
0,09	-4,50	56,88
2,88	0,42	4,095
2,89	0,42	2,76
9,73	-2,46	12,555
0,01	0,03	9,225
2,35	3,48	30,915

Коэффициенты корреляции столбцов ρ_1=0,99999; ρ_2=0,99982; ρ_3=0,98635 рисуют достаточно благоприятную картину, несмотря на бросающееся в глаза различия третьих столбцов **X** и **Y**. И действительно значения c_1= -0,0068; c_2= 0,0336; c_3=-0,5898 сразу же говорят об этом.

Сопоставление описанного выше типа было также выполнено при проектировании нового безопасного конфайнмента (НБК) Чернобыльской АЭС. Его конструктивная схема представлена на рис. 7.

Учитывая тот факт, что достаточно гибкая большепролетная арочная конструкция должна мало реагировать на смещения опорных узлов, рассматривалась гипотеза об отказе от учета влияния податливости основания на работу стального каркаса НБК. Такая гипотеза встретила сильную обструкцию от специалистов, провозглашающих обязательность анализа системы «здание+основание».

Для оценки справедливости выдвинутой гипотезы были выполнены сопоставительные расчеты каркаса в предположении абсолютно жесткого опирания (модель R) и с учетом опирания на упругие опоры, с помощью которых моделировалась работа грунтового основания (модель E).

Для сопоставления были выбраны результаты расчетов на действие одиннадцати вариантов действия нагрузки: 1 – крановая нагрузка (4 крана у оси B); 2 – крановая нагрузка (4 крана у оси G); 3 – полная снеговая нагрузка; 4 – снеговая нагрузка на полупролете (распределение по СНиП); 5 – снеговая нагрузка на полупролете (распределение по Еврокоду); 6 – ветровая нагрузка (1-е направление); 7 – ветровая нагрузка (2-е направление); 8 – ветровая нагрузка (3-е направление); 9 – ветровая нагрузка (4-е направление); 10 – собственный вес; 11 – полезная нагрузка.

Для анализа были выбраны 38 элементов, расположенных в различных местах схемы и достаточно представительно рисующие картину НДС стального несущего каркаса.

Не останавливаясь здесь на деталях вычислений приведем сразу значения коэффициентов корреляции для продольных сил:

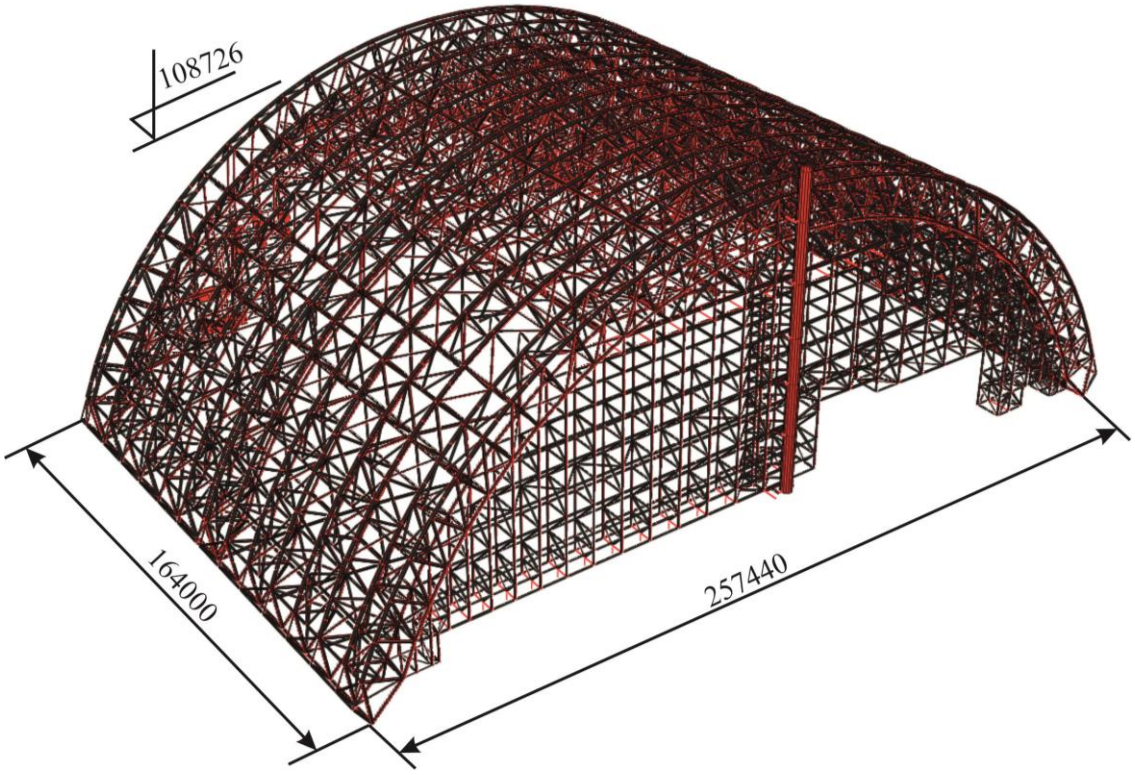


Рисунок 7. Каркас НБК.

- картина НДС по видам нагрузок:

Нагружение	1	2	3	4	5	6
Коэффициенты ρ_j	1,0000	1,0000	0,9994	0,9999	0,9997	0,9997
Нагружение	7	8	9	10	11	
Коэффициенты ρ_j	0,9998	0,9999	1,0000	0,9996	0,9999	

- закономерность поведения различных элементов при изменении нагрузки:

Номер элем.	1	2	3	4	5
Коэффициенты ρ_i	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Номер элем.	6	7	8	9	10
Коэффициенты ρ_i	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Номер элем.	11	12	13	14	15
Коэффициенты ρ_i	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Номер элем.	16	17	18	19	20
Коэффициенты ρ_i	0,9994	1,0000	1,0000	1,0000	0,9999
Номер элем.	21	22	23	24	25
Коэффициенты ρ_i	0,9999	1,0000	0,9997	1,0000	0,9999
Номер элем.	26	27	28	29	30
Коэффициенты ρ_i	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9998
Номер элем.	31	32	33	34	35
Коэффициенты ρ_i	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Номер элем.	36	37	38		
Коэффициенты ρ_i	1,0000	1,0000	1,0000		

Значения коэффициентов c_j не превосходили величину 0,023 для всех вариантов нагружения. Такое отклонение намного меньше возможной ошибки в используемых исходных данных относительно податливости основания и может считаться пренебрежимо малой величиной.

Так была доказана возможность не учитывать податливость основания при расчете стальных конструкций НБК и все дальнейшие расчеты выполнялись таким образом.

ВЫВОДЫ

Предложенные способы сопоставления результатов расчета по конкурирующим расчетным моделям основаны на трех идеях:

- предварительной нормировке внутренних усилий по параметрам несущей способности элементов;
- сопоставление картин НДС по серии нагружений и закономерностей поведения элементов при изменении режима нагружения;
- использование корреляционного анализа для сопоставления характера сопоставляемых наборов значений.

Представляется, что эти методы сравнения конкурирующих результатов могут успешно дополнить и в какой-то мере улучшить традиционный набор применяемых для этого средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Перельмутер А.В., Сливкер В.И.** Повышение качества расчетных обоснований проектов // Бюллетень строительной техники, 2005, №10, с. 59-62.
2. **Перельмутер А.В., Сливкер В.И.** Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: СКАД СОФТ, АСВ, ДМК Пресс, 2011. – 736 с.
3. **Белостоцкий А.М., Каличава Д.К.** Адаптируемые конечноэлементные модели в основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Часть 1. Основы разработанной расчетно-экспериментальной методики // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2012, Volume 8, Issue 4, pp. 19-27.
4. **Белостоцкий А.М., Каличава Д.К., Аул А.А., Нагибович А.И.** Адаптируемые конечноэлементные модели в основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Часть 3. Апробация методики на высотном комплексе, возведенном с выявленными отступлениями от проекта // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2012, Volume 8, Issue 4, pp. 43-52.
5. **Белостоцкий А.М., Каличава Д.К. Новиков П.И., Островский К.М.** Адаптивные конечноэлементные модели в основе системы мониторинга несущих конструкций уникальных зданий // Строительная механика и расчет сооружений, 2014, №6, с. 17-23.
6. **Гмурман В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.
7. **Холопов И.С.** Расчет конструкций зданий и сооружений при динамических воздействиях. – М.: Издательство АСВ, 2012. – 262 с.

Перельмутер Анатолий Викторович, иностранный член РААСН, профессор, доктор технических наук, НПО СКАД Софт, 03037, Украина, г. Киев, ул. Просвящения, дом 3а, офис 2, e-mail: avp@scadsoft.com.

Anatolii V. Perelmuter, Foreign member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Science, Professor, SCAD Soft, Ltd, Kiev, Ukraine e-mail: avp@scadsoft.com.

DOI:10.22337/1524-5845-2016-12-3-114-128

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В АГРЕССИВНОЙ СРЕДЕ

В.В. Петров
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, РОССИЯ

Аннотация: В настоящее время на повестку дня встает проблема определения эволюции жизненного цикла несущих конструкций еще на стадии проектирования и определение их долговечности. В процессе эксплуатации строительные конструкции подвергаются воздействию различных факторов. В настоящей статье рассматриваются актуальные вопросы математического моделирования долговечности тонкостенных пространственных конструкций в агрессивной среде.

Ключевые слова: математическое моделирование, долговечность, тонкостенные пространственные конструкции, агрессивная среда

MATHEMATICAL MODELLING OF LIFETIME OF THIN-WALLED SPATIAL STRUCTURES IN AGGRESSIVE ENVIRONMENT

Vladilen V. Petrov
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, RUSSIA

Abstract: As is known, the problem of determining of the life cycle of load-bearing structures is rather actual at the stage of designing and defining of lifetime. Within operation time constructions are subjected to various factors. The distinctive paper is devoted to mathematical modelling of lifetime of thin-walled spatial structures in in aggressive environment.

Key words: mathematical modelling, lifetime, thin-walled spatial structures, aggressive environment

Механика строительных конструкций, возникновение которой относят к XVII веку, находится в непрерывном развитии. В настоящее время на повестку дня встает проблема определения эволюции жизненного цикла несущих конструкций еще на стадии проектирования и определение их долговечности. В процессе эксплуатации строительные конструкции подвергаются воздействию различных факторов. Сразу после изготовления начинается старение материала конструкции, изменяются во времени нагрузки, конструкция подвергается воздействию высоких и низких температур, рабочих сред агрессивных по отношению к примененным материалам. В результате прочностные и деформационные характеристики материала конструкции со временем изменяются, как правило, в худшую сторону. Агрессивные среды диффундируют в материал конструкции и снижают его прочностные характеристики. При этом реализуются два процесса: происходит перераспределение напряжений в конструкциях; и снижается предел прочности деградирующего материала. Под деградацией свойств материала согласно ГОСТ Р 54257-2010 понимаем постепенное ухудшение характеристик материалов относительно проектных значений в процессе эксплуатации или консервации объекта. Газообразная

или жидкая внешняя среда, проникая (диффундируя) в конструкцию, взаимодействует с ее материалом на химическом или физическом уровне и ослабляет внутренние связи в материале. Прочностные характеристики при этом изменяются. Так как концентрация агрессивной среды в материале конструкции уменьшается по мере удаления от поверхности, то возникнет неоднородность прочностных характеристик, которые становятся функцией концентрации среды и, следовательно, функцией пространственных координат. При этом изменяется расчетная модель конструкции – она становится неоднородной.

Процессы деградации свойств материала происходят во времени, и наступает момент его разрушения, сопровождающийся появлением рассеянных микротрещин. Эти микротрещины с течением времени, образуют магистральные трещины, скорость роста которых велика. Наступает опасная аварийная ситуация. В связи с этим возникает проблема определения расчетным путем еще на стадии проектирования долговечности конструкции, то есть определения времени от начала ее эксплуатации до момента наступления опасного состояния. Это позволит определить срок планового ремонта конструкции или ее замены. Из-за неумения определить долговечность элементов конструкций могут иметь место косвенные потери, связанные с загрязнением окружающей среды и авариями, часто с человеческими жертвами.

Под агрессивной рабочей средой понимаем такую среду, которая ухудшает прочностные характеристики материала. Различные среды по-разному воздействуют на материал, но обычно в нем происходит накопление необратимых повреждений. Снижение прочностных характеристик в разных средах происходит по-разному. Например, в жидких агрессивных средах они интенсивно снижаются в начальный период времени, а далее процесс замедляется, асимптотически приближаясь к некоторой постоянной величине.

Влияние агрессивной рабочей среды на материал конструкции отличается разнообразием, поэтому в рамках одной общей модели учесть это разнообразие невозможно. Речь может идти о построении частных моделей, объединенных похожими результатами воздействия, выявленными экспериментальным путем. Однако у всех моделей есть и нечто общее: воздействие агрессивных сред делает однородный исходный материал неоднородным и его физико-механические характеристики с течением времени изменяются вдоль пространственных координат. Назовем это *развивающейся неоднородностью* свойств материала. Таким образом, под наведенной неоднородностью будем понимать появление развивающейся во времени неоднородности физико-механических характеристик материала нагруженной конструкции под влиянием факторов рабочей среды (воздействие агрессивных жидкостей и газов, физических полей, радиационного облучения и т.д.).

Свойства материала зависят от его состава и технологии обработки в процессе создания конструкции. Исходные свойства материала характеризуются степенью термодинамической неустойчивости, на которую влияют термодинамические факторы. Агрессивность среды определяется ее составом, временем воздействия, температурой, давлением, и другими условиями контактирования с материалом конструкции. Напряженное состояние зависит от величины напряжений и их знака, наличия концентраторов напряжений, цикличности действия нагрузки, градиента упругих или пластических деформаций. При деформировании материал получает дополнительную энергию, понижающую его термодинамическую устойчивость, происходит нарушение сплошности и защитных свойств поверхностных пленок, повышается степень неоднородности материалов вследствие проявления дефектов кристаллической решетки или появления микротрещин.

Разрушение материалов конструкций при совместном действии агрессивной внешней

среды и нагрузки часто называют «коррозией под напряжением», так как склонность материала к разрушению определяется сочетанием трех факторов: свойств материала, свойств агрессивной среды и уровня напряженного состояния.

Интенсивность воздействия агрессивной среды зависит от ее концентрации в объеме образца. С увеличением концентрации наблюдается заметное снижение временного сопротивления материала и увеличение степени нелинейности кривой деформирования. Для моделирования свойств материала важно знать концентрацию агрессивной среды в материале, его химическую активность, характеризующую уровень химических превращений при взаимодействии материала со средой, параметры, оценивающие равномерность распределения поврежденности по объему, температуру, скорость деформирования и тому подобное.

Интегральной характеристикой свойств материала считаем кривую деформирования, в которой находят отражение процессы, происходящие в материале, при взаимодействии с агрессивной средой. По изменению диаграммы деформирования можно судить о пределе прочности и деформационных свойствах материала, о его способности к упрочнению или разупрочнению, степени агрессивности внешней среды по отношению к рассматриваемому материалу. Наибольшие изменения наблюдаются в области площадки текучести (ее уменьшение вплоть до полного исчезновения), кривой упрочнения (замедленное понижение и укорачивание). На начальном (упругом) участке кривой деформирования изменения несущественны – несколько изменяется модуль упругости (как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения).

Если продукты коррозии располагаются на поверхности материала, то со временем толщина конструктивного элемента уменьшается, а напряжения увеличиваются. Так как процесс коррозии протекает во времени, то и рост напряжений также протекает во времени. В результате наступает момент, когда в одной из точек конструктивного элемента напряжения достигнут уровня опасного с точки зрения разрушения материала. Как отмечалось выше, этот момент времени мы будем называть *опасным состоянием* конструкции, а время с начала эксплуатации конструкции в агрессивной среде до времени наступления опасного состояния будем называть ее *долговечностью.*

В том случае, если в результате воздействия агрессивной среды на материал конструкции заметных следов разрушения на ее поверхности не наблюдается; но физико-механические характеристики материала уменьшаются, это означает, что микроповреждения, микротрещины накапливаются в толще материала. С течением времени плотность микроповреждений накапливается, и микротрещины могут образовать магистральную трещину. Это и будет опасное состояние для конструктивного элемента.

Таким образом, мы видим, что природа разрушения конструкционных материалов отличается многообразием. Разрушение имеет место при радиоактивном распаде веществ, при эрозии, при действии нагрузки и т. п. Результаты воздействия на материал агрессивных сред хотя и разнообразны, но имеют ряд общих черт, главная из которых – снижение с течением времени несущей способности конструктивных элементов.

Большое число факторов, влияющих на протекание коррозионного разрушения, сложные физико-химические процессы, происходящие при этом, не позволяют создать всеобъемлющую математическую модель, которая описывала бы взаимодействии различных материалов с многочисленными средами и сопутствующими факторами. Поэтому более приемлем феноменологический подход и построение частных моделей коррозии. При построении модели предполагается наличие экспериментальных кривых деформирования, полученных при испытании образцов, различное время взаимодействовавших с агрессивной средой при различных уровнях

предварительного нагружения. В этом случае на основании экспериментальных результатов можно построить физические уравнения механики сплошной среды, учитывающие изложенные выше особенности.

Взаимодействие материалов с агрессивными средами имеет сложную физико-химическую природу, поэтому при построении модели необходим феноменологический подход, позволяющий на основе экспериментальных данных строить математическую модель этого взаимодействия, не требуя полной ясности в содержании тех физико-химических процессов, которые протекают при таком взаимодействии. Поэтому для построения математических моделей необходимы целенаправленные эксперименты, требования к которым в интересах специалистов-расчетчиков формулируются в процессе построения модели.

Используя экспериментальные данные можно построить математическую модель, описывающую взаимодействие агрессивной среды и конструкционного материала. Однако невозможно построить одну обобщенную модель, которая могла бы корректно описывать поведение различных материалов в разнообразных агрессивных средах. Ввиду многообразия видов воздействий агрессивной среды получим и многообразие математических моделей. Эти модели объединим в несколько характерных групп:

1. поверхностное разрушение материала, с постепенным исключением поверхностного слоя при расчете конструкции, то есть постепенное изменение геометрических характеристик конструкции;
2. структурные внутренние физико-химические процессы, приводящие к деградации механических свойств материала, не требующие при расчете изменений геометрических размеров конструкции;
3. модели, накопления рассеянных микроповреждений в толще материала конструкции.

Феноменологический подход позволяет определить компромисс между теоретическим и экспериментальным изучением физических закономерностей взаимодействия материала и агрессивной среды и проблемами прочности, устойчивости и долговечности конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия агрессивной среды. При решении этой проблемы, мы, чаще всего, попадаем в такую область изменения деформаций, где необходимо учитывать физическую нелинейность материала, а при решении задач устойчивости оболочек необходимо еще учитывать большие перемещения и углы поворота, то есть учитывать геометрическую нелинейность.

Математическая модель строится методом структурных параметров. В фундаментальную систему уравнений, описывающую напряженно-деформируемое состояние конструкции, вводятся дополнительные параметры (функции) учитывающие изменение толщины (поверхностная коррозия, коррозионный износ), либо накопление рассеянных повреждений, либо изменение механических свойств материала, либо изменение кривой деформирования. Если под влиянием агрессивной среды прочностные и деформационные свойства ухудшаются, то эти функции называют деградационными функциями. Деградационные функции вводятся в физическую группу уравнений фундаментальной системы уравнений. Для того, чтобы число неизвестных соответствовало числу уравнений необходимо пополнить фундаментальную систему уравнениями, описывающими скорость изменения деградационных функций в зависимости от параметров, получаемых в результате экспериментальных исследований. Функции деградации могут иметь интегральный характер [1,2] или иметь вид дифференциальных уравнений [3,4].

Проблема замыкания уравнений механики сплошной среды базируется на учете физических свойств этой среды. Рассмотрим элементарный объем среды в виде прямоугольного параллелепипеда. Полагаем, что в лю-

бой момент времени этот объем состоит из одних и тех же материальных частиц. С молекулярной точки зрения в этом объеме содержится большое число атомов, молекул, кристаллов или зерен. Обозначим через $\zeta = \{\zeta_1,..,\zeta_n\}$ совокупность *немеханических* параметров, влияющих на *механические* свойства среды. В любой момент времени форма элементарного объема в окрестности произвольной точки тела определяется тензором деформаций. С течением времени параметры ζ изменяются, что приводит к изменению тензоров напряжений и деформаций. Если тензор деформаций задан как функция времени, то задан процесс деформации элементарного объема, а если тензор напряжений задан как функция времени, то задан процесс нагружения элементарного объема.

Таким образом, в соответствии с постулатом макроскопической определимости [5,6], для заданной физической среды должны существовать функционалы вида

$$T_\sigma(t) = T_\sigma\left(T_\varepsilon(t), \zeta(t)\right)\Big|_{t_0}^{t} \qquad (1)$$

Это означает, что тензор напряжений зависит не только от значений тензора деформаций и величин немеханических параметров в текущий момент времени, но и от всех значений в предшествующие ему моменты времени. Если задан процесс нагружения, то тензор деформаций однозначно определяется выражением

$$T_\varepsilon(t) = T_\varepsilon\left(T_\sigma(t), \zeta(t)\right)\Big|_{t_0}^{t} \qquad (2)$$

Конкретизация функционалов осуществляется при изучении физических свойств рассматриваемых сред. Параметры $\zeta(t)$ считаются заданными функциями времени. В действительности часто они сами являются искомыми и могут зависеть от протекания процесса $T_\varepsilon(t)$. В этом случае необходимо дополнительно использовать законы термодинамики, диффузии и другие физические законы, известные для *немеханических* параметров. Явный вид параметров $\zeta(t)$ создается материаловедами в результате экспериментальных исследований. При численной реализации удобно придать функционалам (1), (2) инкрементальный вид, используя временной инкремент Δt или инкременты других *немеханических* параметров изменяющихся во времени.

Согласно теории структурных параметров для любого процесса, происходящего в сплошной среде, может быть построено уравнение состояния, из которого характеристики процесса определяются как функции параметров внешнего воздействия и других структурных параметров. Для структурных параметров формулируются *кинетические* уравнения, по которым можно восстановить историю нагружения. При построении таких уравнений обычно считают, что структурные параметры макроскопические и их можно вводить формально, но при необходимости им можно придать и определенный физический смысл. Используя эти уравнения можно определить характеристики процессов деформирования и микроразрушения, не исследуя при этом микроструктуру материала. В общем же случае структурные параметры вводятся в виде гипотез, опирающихся на экспериментальные исследования.

Кинетические уравнения представляют собой математическую модель изменения во времени того или иного параметра конструкции или материала, из которого она выполнена, и не описывают те физико-химические процессы, которые вызвали эти изменения. Они опираются лишь на гипотезы и предположения феноменологического характера, являются математической формализацией полученных экспериментальных данных и должны отличаться математической простотой. Поэтому кинетические уравнения не могут претендовать на боль-

шую общность, и пригодны лишь для получения разумного приближения при описании ограниченного класса явлений.

Нелинейная теория балок, пластинок и оболочек, осложненная развивающейся неоднородностью механических свойств материала, приводит к необходимости решения сложных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, учитывающих историю деформирования материала и деградацию его механических свойств, и разработки эффективных алгоритмов численной реализации полученных уравнений. При исследовании процессов деформирования конструкций будем применять метод последовательного возмущения параметров, сводящий решение нелинейных уравнений к последовательному решению линеаризованных уравнений сначала при шаговом увеличении нагрузки и затем при шаговом увеличении времени, рассматриваемом как параметр.

При создании математической модели влияние агрессивной среды будем учитывать, вводя в физическое уравнение теории малых упруго-пластических деформаций скалярную функцию, которая строится по результатам экспериментальных исследований и описывает деградацию секущего модуля под влиянием изменения концентрации агрессивной среды.

Рост дефектов, вызванный воздействием агрессивной среды, вызывает постепенное уменьшение эффективного сечения и, следовательно, увеличение приведенных (эффективных) напряжений

$$\sigma^* = \sigma_{\max} / \Phi,$$

где Φ – функция деградации.

Введем понятие девиатора эффективных напряжений

$$D_\sigma^* = \frac{1}{\Phi} D_\sigma .$$

В этом случае физическое уравнение примет следующий вид

$$D_\sigma = \frac{2}{3}\Phi E_c D_\varepsilon \qquad (3)$$

где $D_\sigma = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_0$

– девиатор тензора напряжений;

$$D_\varepsilon = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon_0$$

– девиатор тензора деформаций; δ_{ij} – символ Кронекера,

$$\sigma_0 = \left(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z\right)/3$$

– среднее напряжение;

$$\varepsilon_0 = \left(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z\right)/3$$

– средняя деформация (для несжимаемого материала $\varepsilon_0 = 0$); $\Phi(B)$ – функция деградации секущего модуля, зависящая от концентрации $B(x, y, z, t)$ агрессивной среды;

$$E_c = \sigma_i / \varepsilon_i$$

– секущий модуль, σ_i – интенсивность напряжений, ε_i – интенсивность деформаций. Можно сконструировать функцию деградации и с большим числом учитываемых параметров.

Для получения инкрементальных уравнений вычислим дифференциал Гато уравнения (3). Возмущая обе части этого уравнения, получим

$$D_\sigma + \lambda\Delta D_\sigma =$$

$$= \frac{2}{3}\left[\left(\Phi + \lambda\Delta\Phi\right)\left(E_c + \lambda\Delta E_c\right)\left(D_\varepsilon + \lambda\Delta D_\varepsilon\right)\right] \qquad (4)$$

здесь λ – параметр возмущения. Дифференцируя обе части этого уравнения по параметру λ и полагая затем $\lambda = 0$, получим в результате инкрементальное уравнение

$$\Delta D_\sigma = \frac{2}{3}\left(\Phi E_c \Delta D_\varepsilon + \Phi D_\varepsilon \Delta E_c + E_c D_\varepsilon \Delta\Phi\right) \tag{5}$$

Приращения компонент девиатора тензора напряжений вида $\Delta\sigma_x / \Phi, ..., \Delta\tau_{zx} / \Phi$ будем называть приведенными (эффективными) напряжениями. Так как функция $\Phi \le 1$, то приведенные приращения напряжений, с учетом разупрочнения материала будут больше. Учитывая это, уравнению (5) придадим следующий вид

$$\frac{\Delta D_\sigma}{\Phi} = \Delta D_\sigma^* = \\ = \frac{2}{3}\left(E_c \Delta D_\varepsilon + D_\varepsilon \Delta E_c + E_c D_\varepsilon \frac{\Delta\Phi}{\Phi}\right). \tag{6}$$

где ΔD_σ^* – приращение девиатора тензора приведенных напряжений.

Приращения секущего модуля и функции деградации вычислим по формулам

$$\Delta E_c = \frac{dE_c}{d\varepsilon_i}\Delta\varepsilon_i, \quad \Delta\Phi = \frac{d\Phi}{dt}\Delta t \tag{7}$$

Подставляя (7) в (6) и, полагая, как показано в [4], справедливым равенство направляющих тензоров

$$D_\varepsilon / \varepsilon_i = \Delta D_\varepsilon / \Delta\varepsilon_i,$$

окончательно получим

$$\Delta D_\sigma^* = \frac{2}{3}\left(E_k \Delta D_\varepsilon + E_c D_\varepsilon \frac{\Delta\Phi}{\Phi}\right), \tag{8}$$

где $E_k = d\sigma_i / d\varepsilon_i$ – касательный модуль.

Для плоской задачи, имеем систему уравнений, связывающую приращения приведенных напряжений с приращениями деформаций

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_x^* - \frac{1}{2}\Delta\sigma_y^* &= E_k\Delta\varepsilon_x + E_c\varepsilon_x\frac{\Delta\Phi}{\Phi} \\ \Delta\sigma_y^* - \frac{1}{2}\Delta\sigma_x^* &= E_k\Delta\varepsilon_y + E_c\varepsilon_y\frac{\Delta\Phi}{\Phi} \\ \Delta\tau_{xy}^* &= \frac{1}{3}E_k\Delta\gamma_{xy} + \frac{1}{3}E_c\gamma_{xy}\frac{\Delta\Phi}{\Phi}, \end{aligned} \tag{9}$$

Из уравнений (9) получаем выражения для определения приращений относительных линейных и угловых деформаций

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_x &= \frac{1}{E_k}\left(\Delta\sigma_x^* - \frac{1}{2}\Delta\sigma_y^*\right) - \frac{E_c}{E_k}\varepsilon_x\frac{\Delta\Phi}{\Phi}, \\ \Delta\varepsilon_y &= \frac{1}{E_k}\left(\Delta\sigma_y^* - \frac{1}{2}\Delta\sigma_x^*\right) - \frac{E_c}{E_k}\varepsilon_y\frac{\Delta\Phi}{\Phi}, \\ \Delta\gamma_{xy} &= \frac{3}{E_k}\Delta\tau_{xy}^* - \frac{E_c}{E_k}\gamma_{xy}\frac{\Delta\Phi}{\Phi}. \end{aligned} \tag{10}$$

Эти инкрементальные физические уравнения используются для вывода инкрементальных уравнений изгиба балки, пластинки или оболочки. Заметим, что с учетом (7) имеем

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi} = \frac{1}{\Phi}\frac{d\Phi}{dt}\Delta t$$

и в уравнениях появляется инкремент времени.

Для вывода разрешающих уравнений изгиба пологих оболочек необходимы статические, геометрические и физические инкрементальные уравнения. Уравнения равновесия имеют вид:

$$\frac{\partial^2 \Delta M_x^*}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^2 \Delta M_{xy}^*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta M_y^*}{\partial y^2} + N_x^* \frac{\partial^2 \Delta w}{\partial x^2} + N_y^* \frac{\partial^2 \Delta w}{\partial y^2} + 2N_{xy}^* \frac{\partial^2 \Delta w}{\partial x \partial y} +$$
$$+ \Delta N_x^* \left(k_1 + \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) + \Delta N_y^* \left(k_2 + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) + 2\Delta N_{xy}^* \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} = -\Delta q, \qquad (11)$$
$$\frac{\partial \Delta N_x^*}{\partial x} + \frac{\partial \Delta N_{xy}^*}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \Delta N_{xy}^*}{\partial x} + \frac{\partial \Delta N_y^*}{\partial y} = 0$$

где M_x^*, M_y^*, M_{xy}^* – приведенные изгибающие и крутящий моменты, N_x^*, N_y^*, N_{xy}^* – приведенные осевые усилия, W – полный (накопленный) прогиб, Δw – приращение прогиба, k_1, k_2 – главные кривизны оболочки.

Инкрементальные физические уравнения, связывающие приращения напряжений с деформациями имеют вид (9). Выражения приращений усилий мембранной и моментной групп определяются по формулам:

$$\Delta N_x^* = \int_{-h/2}^{h/2} \Delta \sigma_x^* dz, \quad \Delta N_y^* = \int_{-h/2}^{h/2} \Delta \sigma_y^* dz,$$
$$\Delta N_{xy}^* = \int_{-h/2}^{h/2} \Delta \tau_{xy}^* dz,$$
$$\Delta M_x^* = \int_{-h/2}^{h/2} \Delta \sigma_x^* z dz, \quad \Delta M_y^* = \int_{-h/2}^{h/2} \Delta \sigma_y^* z dz,$$
$$\Delta M_{xy}^* = \int_{-h/2}^{h/2} \Delta \tau_{xy}^* z dz. \qquad (12)$$

Инкрементальные геометрические уравнения при учете геометрической нелинейности имеют вид [4]

$$\Delta \varepsilon_x = \frac{\partial \Delta u}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial x}\frac{\partial \Delta w}{\partial x} - k_x \Delta w;$$
$$\Delta \varepsilon_y = \frac{\partial \Delta \upsilon}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial y}\frac{\partial \Delta w}{\partial y} - k_y \Delta w; \qquad (13)$$
$$\Delta \gamma_{xy} = \frac{\partial \Delta u}{\partial y} + \frac{\partial \Delta \upsilon}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial x}\frac{\partial \Delta w}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial y}\frac{\partial \Delta w}{\partial x}$$

где u, υ – тангенциальные перемещения.

Исключая из уравнений (13) приращения тангенциальных перемещений получим уравнение неразрывности приращений деформаций:

$$\frac{\partial^2 \Delta \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta \varepsilon_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Delta \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} + \nabla_k^2 \Delta w +$$
$$+ L(W, \Delta w) = 0, \qquad (14)$$

В работе [4] показано, что для тонких оболочек справедливы следующие выражения приращений внутренних усилий:

$$\Delta N_x^* = I_k \left(\Delta \varepsilon_x + \frac{1}{2}\Delta \varepsilon_y \right) + I_c^* \left(\varepsilon_x + \frac{1}{2}\varepsilon_y \right),$$
$$\Delta N_y^* = I_k \left(\Delta \varepsilon_y + \frac{1}{2}\Delta \varepsilon_x \right) + I_c^* \left(\varepsilon_y + \frac{1}{2}\varepsilon_x \right),$$
$$\Delta N_{xy}^* = \frac{1}{4} I_k \Delta \gamma_{xy} + \frac{1}{4} I_c^* \gamma_{xy}. \qquad (15)$$

$$\Delta M_x^* = -D_{k,2} \left(\frac{\partial^2 \Delta w}{\partial x^2} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 \Delta w}{\partial y^2} \right) -$$
$$- D_{c,2}^* \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right),$$
$$\Delta M_y^* = -D_{k,2} \left(\frac{\partial^2 \Delta w}{\partial y^2} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 \Delta w}{\partial x^2} \right) -$$
$$- D_{c,2}^* \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right),$$

$$\Delta M_{xy}^{*} = -\frac{1}{2} D_{k,2} \frac{\partial^2 \Delta w}{\partial x \partial y} - \frac{1}{2} D_{c,2}^{*} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}. \quad (16)$$

Переменные жесткости оболочки на растяжение-сжатие

$$I_k(x,y), \quad I_c^{*}(x,y)$$

и изгиб

$$D_k(x,y), \quad D_c^{*}(x,y)$$

определяются по формулам:

$$I_k = \frac{4}{3}\int_{-h/2}^{h/2} E_k dz, \quad I_c^{*} = \frac{4}{3}\int_{-h/2}^{h/2} E_c \frac{\Delta\Phi}{\Phi} dz,$$
$$D_k = \frac{4}{3}\int_{-h/2}^{h/2} E_k z^2 dz, \quad D_c^{*} = \frac{4}{3}\int_{-h/2}^{h/2} E_c \frac{\Delta\Phi}{\Phi} z^2 dz \quad (17)$$

Вводя функцию усилий и ее приращение по формулам

$$\Delta N_x^{*} = \frac{\partial^2 \Delta\varphi}{\partial y^2}, \quad \Delta N_y^{*} = \frac{\partial^2 \Delta\varphi}{\partial x^2},$$
$$\Delta N_{xy}^{*} = -\frac{\partial^2 \Delta\varphi}{\partial x \partial y},$$
$$N_x^{*} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}, \; N_y^{*} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \; N_{xy}^{*} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}, \quad (18)$$

и подставляя (18) в (15), получим

$$\Delta\varepsilon_x = \frac{4}{3I_k}\left(\frac{\partial^2 \Delta\varphi}{\partial y^2} - \frac{1}{2}\frac{\partial^2 \Delta\varphi}{\partial x^2}\right) - \frac{I_c^{*}}{I_k}\varepsilon_x,$$
$$\Delta\varepsilon_y = \frac{4}{3I_k}\left(\frac{\partial^2 \Delta\varphi}{\partial x^2} - \frac{1}{2}\frac{\partial^2 \Delta\varphi}{\partial y^2}\right) - \frac{I_c^{*}}{I_k}\varepsilon_y, \quad (19)$$
$$\Delta\gamma_{xy} = -\frac{4}{I_k}\frac{\partial^2 \Delta\varphi}{\partial x \partial y} - \frac{I_c^{*}}{I_k}\gamma_{xy}$$

Подставляя выражения (19) в уравнение неразрывности деформаций (14) после необходимых преобразований получим инкрементальное уравнение неразрывности деформаций в следующем виде

$$\frac{4}{3}\nabla^2\left(I_k^{-1}\nabla^2\Delta\varphi\right) - 2L\left(I_k^{-1}, \Delta\varphi\right) + \nabla_k^2 \Delta w +$$
$$+ L\left(W, \Delta w\right) = \Delta q_{\phi}^{(1)} \quad (20)$$

где дифференциальный оператор $L(A,B)$ определяется формулой

$$L(A,B) = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2}\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} - 2\frac{\partial^2 A}{\partial x \partial y}\frac{\partial^2 B}{\partial x \partial y} \quad (21)$$

а $\Delta q_{\phi}^{(1)}$ имеет вид:

$$\Delta q_{\phi}^{(1)} = \frac{\partial^2}{\partial y^2}\left(\frac{I_c^{*}}{I_k}\varepsilon_x\right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\frac{I_c^{*}}{I_k}\varepsilon_y\right) -$$
$$- \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}\left(\frac{I_c^{*}}{I_k}\gamma_{xy}\right). \quad (22)$$

В работе [4] было показано, что фиктивную нагрузку

$$\Delta q_{\phi}^{(1)}$$

вследствие ее малости можно положить равной нулю. Это было подтверждено также при численном решении многочисленных задач расчета пологих оболочек.

Подставляя выражения (18) в уравнения равновесия (11) убеждаемся, что последние два уравнения равновесия тождественно удовлетворяются, а первое уравнение приобретает вид:

$$\frac{\partial^2 \Delta M_x^*}{\partial x^2}+2\frac{\partial^2 \Delta M_{xy}^*}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \Delta M_y^*}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}\frac{\partial^2 \Delta w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}\frac{\partial^2 \Delta w}{\partial y^2}-2\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}\frac{\partial^2 \Delta w}{\partial x \partial y}+$$
$$+\frac{\partial^2 \Delta \varphi}{\partial y^2}\left(k_x+\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}\right)+\frac{\partial^2 \Delta \varphi}{\partial x^2}\left(k_y+\frac{\partial^2 W}{\partial y^2}\right)-2\frac{\partial^2 \Delta \varphi}{\partial x \partial y}\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}=-\Delta q, \quad (23)$$

Подставляя в это уравнение приращения приведенных моментов (16), окончательно получим инкрементальное уравнение равновесия

$$\nabla^2\left(D_k\nabla^2\Delta w\right)-\frac{1}{2}L\left(D_k,\Delta w\right)-L\left(\varphi,\Delta w\right)-\nabla_k^2\left(\Delta\varphi\right)-L\left(\Delta\varphi,W\right)=\Delta q-\Delta q_\phi^{(2)} \quad (24)$$

Приращение фиктивной поперечной нагрузки $\Delta q_\phi^{(2)}$ определяется по формуле

$$\Delta q_\phi^{(2)}=-\nabla^2\left(D_c^*\nabla^2 W\right)+\frac{1}{2}L\left(D_c^*,W\right) \quad (25)$$

Присваивая индекс n в качестве номера этапа_последовательного нагружения, полученную линейную инкрементальную систему уравнений, описывающую напряженно-деформированное состояние оболочек с наведенной развивающейся неоднородностью с учетом геометрической и физической нелинейностей запишем в операторном виде следующим образом:

$$\left.\begin{aligned}\Omega_{11}\Delta\varphi_{n+1}+\Omega_{12}\Delta w_{n+1}&=0\\ -\Omega_{21}\Delta\varphi_{n+1}+\Omega_{22}\Delta w_{n+1}&=\Delta q_{n+1}-\Delta q_\phi^{(2)}\end{aligned}\right\} \quad (26)$$

здесь введены следующие обозначения дифференциальных операторов:

$$\Omega_{11}=\frac{4}{3}\nabla^2\left[J_{k,n}^{-1}\nabla^2\right]-2L\left(J_{k,n}^{-1},\ldots\right)$$
$$\Omega_{12}=\Omega_{21}=\nabla_{k,n}^2+L\left(W_n,\ldots\right)$$
$$\Omega_{22}=\nabla^2\left[D_{k,n}\nabla^2\right]-\frac{1}{2}L\left(D_{k,n},\ldots\right)-L\left(\varphi_n,\ldots\right), \quad (27)$$

где вместо точек надо поставить функцию, на которую действует оператор.

В дифференциальных операторах (27) использованы следующие обозначения: ∇^2 – оператор Лапласа; оператор

$$\nabla_k^2=k_2\frac{\partial^2}{\partial x^2}+k_1\frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

– оператор Власова, зависящий от главных кривизн оболочки k_1, k_2.

Так как система уравнений (26) линейна, то, применяя принцип суперпозиции, процесс нагружения осуществляем в два этапа. На первом этапе последовательными приращениями нагружаем оболочку до заданного уровня нагрузки, то есть, решаем систему уравнений

$$\left.\begin{aligned}\Omega_{11}\Delta\varphi_{n+1}+\Omega_{12}\Delta w_{n+1}&=0\\ -\Omega_{21}\Delta\varphi_{n+1}+\Omega_{22}\Delta w_{n+1}&=\Delta q_{n+1}\end{aligned}\right\} \quad (28)$$

а на втором этапе последовательно нагружаем оболочку фиктивной поперечной нагрузкой до наступления опасного состояния, решая систему уравнений

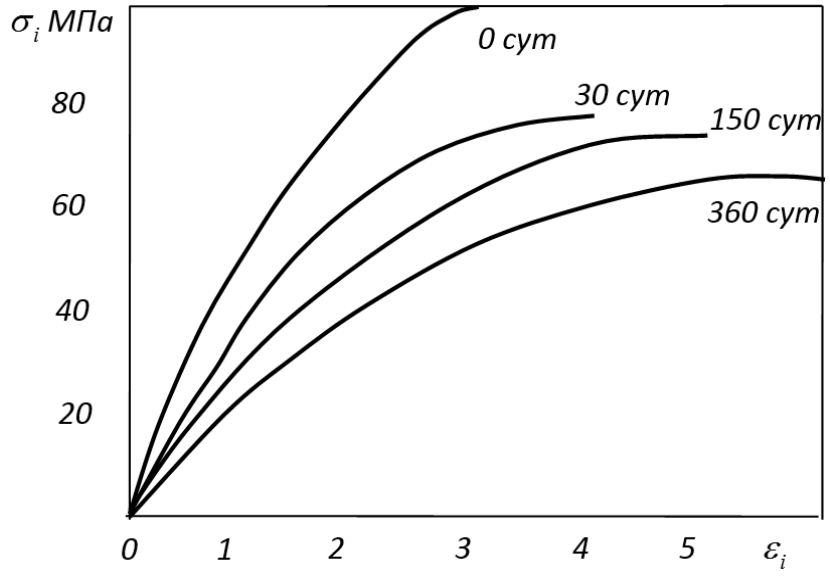


Рисунок 1. Диаграммы деформирования образцов полиэфирного бетона, выдержанных различное время в жидкой среде 20% раствора едкого натрия.

$$\left.\begin{aligned} \Omega_{11}\Delta\varphi_{n+1} + \Omega_{12}\Delta w_{n+1} = 0 \\ -\Omega_{21}\Delta\varphi_{n+1} + \Omega_{22}\Delta w_{n+1} = -\Delta q_{\phi}^{(2)} \end{aligned}\right\} \qquad (29)$$

Системы уравнений (28), (29) дополняются четырьмя граничными условиями в каждой точке контура оболочки, два из которых записываются через функцию Δw, два других – через функцию $\Delta\varphi$.

В качестве примера рассмотрим шарнирно опертую по контуру оболочку, изготовленную из полимербетона, под действием равномерно распределенной нагрузки. На рис. 1 представлены диаграммы деформирования образцов полиэфирного бетона, выдержанных различное время в жидкой среде 20% раствора едкого натрия [7]

Обработка экспериментальных результатов позволила записать функцию деградации в виде экспоненты:

$$\Phi\left(B\right) = \exp\left(-\lambda\, B\left(z\right)\right), \qquad (30)$$

где $\lambda = 0,4069\, см^3 / г$ – экспериментальный коэффициент, характеризующий степень деградации секущего и касательного модулей материала. Так как функция деградации секущего модуля есть величина безразмерная, то размерность параметра λ обратна размерности концентрации среды. Функция деградации

$$\Phi\left(0\right) = 1,$$

то есть при отсутствии агрессивной среды деградации секущего модуля не происходит.

Если относительная скорость изменения функции деградации при изменении концентрации агрессивной среды есть величина постоянная, выражение фиктивной нагрузки имеет следующий вид [4]

$$\Delta q_{\phi}^{(2)} = -\left(\frac{B_0 \lambda h}{2\delta}\right)\left[q\left(x,y\right) + \nabla_k^2\varphi\right]\frac{\Delta\delta}{\delta} \qquad (31)$$

где δ – глубина деградированного слоя, h – толщина оболочки, B_0 – концентрация агрессивной среды на поверхности оболочки, λ – экспериментальный коэффициент.

При расчете оболочек вводим безразмерные параметры и функции по формулам

$$K_\xi = \frac{k_x (2a)^2}{h}, K_\eta = \frac{k_y (2b)^2}{h}, W^* = \frac{W}{h}, \Phi = \frac{\varphi}{Eh^3}, P^* = \frac{12qa^2b^2(1-\mu^2)}{Eh^4}. \quad (32)$$

Диаграмма деформирования $\sigma_i - \varepsilon_i$ аппроксимировалась кубическими сплайнами. Результаты получены с использованием двухшагового метода последовательного возмущения параметров [8]. Численные результаты на каждом этапе возмущения параметров получены методом конечных разностей (МКР) с сеткой 32×32.

На рис. 2 приведены результаты расчета долговечности оболочки с кривизной

$$K_\xi = K_\eta = 64.$$

В верхнем правом углу рисунка показаны зависимости «нагрузка прогиб» в нейтральной среде. Штрихпунктирными линиями показаны зависимости «нагрузка – прогиб в четверти оболочки» с учетом только физической нелинейности, причем решение было остановлено при достижении в оболочке опасного состояния, то есть условия предела прочности

$$\sigma_{i,\max} = \sigma_в$$

в какой-либо точке оболочки. Сплошными линиями показаны изменения прогибов в четверти диагонали оболочки, пунктиром показаны зависимости «нагрузка – прогиб в центре оболочки», при построении которых учитывались два вида нелинейности – геометрическая и физическая, а в качестве ведущего параметра использовано приращение максимального прогиба, который растет монотонно. При этом исчезают проблемы, связанные с построением сложных петлеобразных кривых для конкретных точек оболочки.

На втором этапе решения поперечная нагрузка по достижении заданных величин из диапазона

$$P^* = 200 - 1200$$

больше не увеличивалась, а изменение НДС оболочки происходило за счет деградации прочностных характеристик ее материала. В качестве ведущего параметра принята величина последовательного перемещения фронта деградации $\Delta\delta$. При двустороннем симметричном проникновении в материал оболочки агрессивной среды величина ведущего параметра решения определялась с помощью численных экспериментов. В расчетах он принят

$$\Delta\delta = h/256.$$

На рис. 2 показана методика расчета долговечности оболочки. Наступление опасного состояния определяется следующим образом. По вертикальной оси откладываем отношение $\sigma_i / \sigma_{i,\max}$, где σ_i – интенсивность напряжений в центре оболочки, при заданной величине нагрузки P^*, $\sigma_{i,\max}$ – максимальная интенсивность напряжений в оболочке в окрестности критической нагрузки потери устойчивости в нейтральной среде. По горизонтальной оси откладываем время воздействия агрессивной среды, на оболочку подсчитываемого по формуле

$$t = \left(\delta(t)/\alpha\right)^2,$$

где $\alpha = 13{,}05\ мм/год^{0{,}5}$ – коэффициент определяемый экспериментально. Нисходящая кривая характеризует изменение временного сопротивления $\sigma_в(t)$ материала в зависимости от времени взаимодействия с агрессивной средой (кривая длительной прочности) и представляет собой отношение

$$\sigma_в(t)/\sigma_в,$$

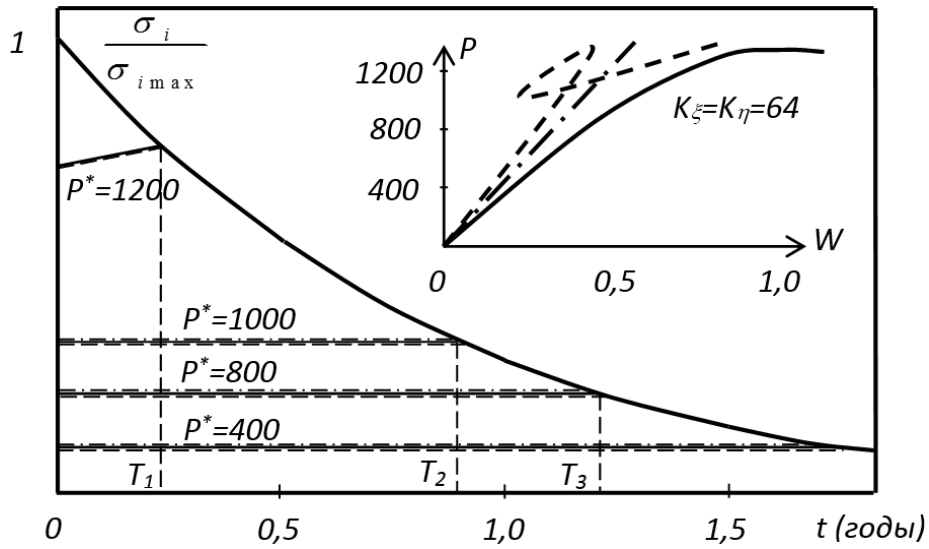


Рисунок 2. Результаты расчета долговечности оболочки с кривизной $K_\xi = K_\eta = 64$.

где $\sigma_в$ – временное сопротивление материала в нейтральной среде. Пересечение восходящих ветвей решения с нисходящей кривой временного сопротивления определяет наступление опасного состояния или долговечность конструкции в агрессивной среде (точки T_1, T_2, T_3).

Численно изучено влияние функции $\Delta q_ф^{(1)}$ на НДС оболочки. Сплошными линиями показаны результаты расчета с учетом $\Delta q_ф^{(1)}$ и физической и геометрической нелинейностей.

Штрих пунктирные линии получены с учетом $\Delta q_ф^{(1)}$ и физической нелинейности. Пунктирные линии получены при условии

$$\Delta q_ф^{(1)} = 0.$$

Практически эти три кривые сливаются в одну, что подтверждает возможность не учитывать при расчетах $\Delta q_ф^{(1)}$, а при определении долговечности на втором этапе решения можно ограничиться более простыми уравнениями, учитывающими только физическую нелинейность.

Анализ результатов, полученных для оболочек с учетом лишь физической нелинейности, показал, что для рассматриваемого материала оболочки условие

$$\sigma_{i,\max} = \sigma_в,$$

соответствующее наступлению опасного состояния, наступает при исчерпании прочности материала при нагрузках меньших критических, долговечность оболочек T_i , соответствующая различным уровням нагружения, не пропорциональна величине первоначально приложенной нагрузки. Отметим, что долговечность оболочек возрастает с увеличением безразмерных параметров кривизны за счет уменьшения относительной толщины оболочки

$$h/(2a)$$

и увеличения ее стрелы подъема.

На рис. 3 приведены результаты расчета долговечности пластинки выполненной из аналогичного полимербетона при действии равномерно распределенной нагрузки. Агрессивная среда – 30% едкий натрий.

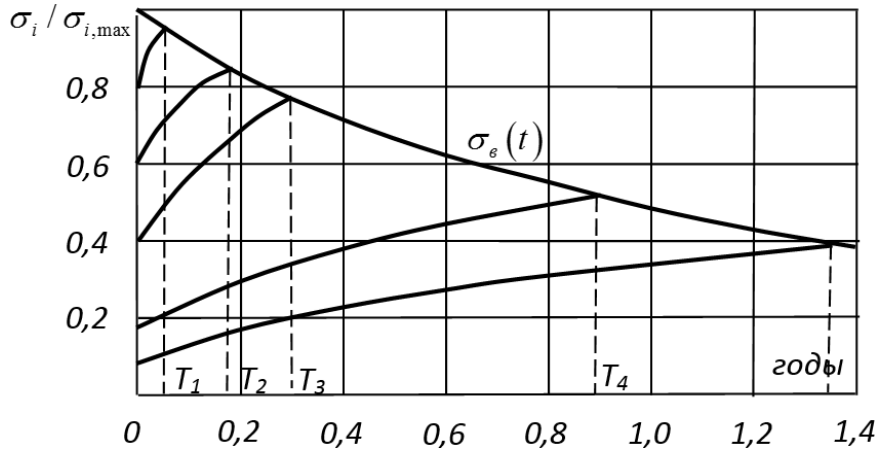


Рисунок 3. Результаты расчета долговечности пластинки выполненной из аналогичного полимербетона при действии равномерно распределенной нагрузки. Агрессивная среда – 30% едкий натрий.

Численные результаты показывают, что при уровнях нагружения, соответствующих одинаковым величинам наибольших интенсивностей деформаций $\varepsilon_{i,\max}$, долговечность гибких оболочек из нелинейно деформируемого материала превышает долговечность физически нелинейных пластинок.

Это объясняется тем, что в оболочках доминируют усилия мембранной группы, которые равномерно воспринимаются всем сечением оболочки, а деградация свойств материала происходит в тонком поверхностном слое, что незначительно снижает жесткость оболочки на растяжение-сжатие по сравнению с изгибной жесткостью. В изгибаемых же пластинках зоны максимальных напряжений совпадают с зонами деградации свойств материала, что заметнее влияет на изменение изгибных жесткостей пластинки.

Для определения расчетным путем долговечности конструкций при воздействии агрессивной среды в качестве одного из вариантов можно использовать теорию накопления повреждений. При этом предполагается, что при отсутствии агрессивной среды, в материале не происходит накопления повреждений, и только после воздействия среды начинается интенсивный процесс их образования и накопления, приводящий к преждевременному разрушению конструкции. В соответствии с этой схемой рассуждений формулируется задача о длительной прочности элементов конструкций в агрессивных средах. К сожалению, в рамках статьи не представляется возможным подробно описать этот вариант определения долговечности конструкций, подробно изложенный в монографиях [3,4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соломатов В.И., Селяев В.П.** Химическое сопротивление композиционных строительных материалов. М.: Стройиздат, 1987. – 264 с.
2. **Селяев В.П., Соломатов В.И., Ошкина Л.М.** Химическое сопротивление наполненных цементных композитов. Саранск: Изд-во МГУ, 2001. – 152 с.
3. **Петров В.В., Овчинников И.Г., Шихов Ю.М.** Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. Саратов: изд-во СГУ. 1987. – 285 с.
4. **Петров В.В.** Нелинейная инкрементальная строительная механика. М.: Инфра-Инженерия. 2014. – 480 с.
5. **Ильюшин А.А.** Пластичность. Основы общей математической теории. М., Изд-во АН СССР, 1963.
6. **Ильюшин А.А.** Механика сплошной среды. Изд-во МГУ, 1971.

7. **Селяев П.В.** Диаграммы деформирования композиционных материалов при воздействии жидких агрессивных сред. // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред. Саратов: СГТУ, 2006, с. 46-52.
8. **Петров В.В.** Двухшаговый метод последовательного возмущения параметров и его применение к решению нелинейных задач механики твердого деформируемого тела. // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред. Саратов. СГТУ, 2001, с. 6-12.

Петров Владилен Васильевич, академик РААСН, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Теория сооружений и строительных конструкций», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.; 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77;
тел. +7(8452) 99-86-03; факс +7(8452) 99-88-10;
e-mail: vvp-sstu@mail.ru, vvp@sstu.ru

Vladilen V. Petrov, Full Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Dr.Sc., Head of Department “Theory of Structures”, Yuri Gagarin Saratov State Technical University; 77 Politechnicheskaya street, Saratov, Russia, 410054;
phone +7(8452) 99-86-03; fax +7(8452) 99-88-10;
e-mail: vvp-sstu@mail.ru, vvp@sstu.ru

DOI:10.22337/1524-5845-2016-12-3-129-144

ОБ ОСНОВНЫХ ИТОГАХ ШЕСТОГО МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ»

***В.И. Травуш*[1,2,3], *П.А. Акимов*[2,3,4,5], *А.В. Баенхаев*[6], *А.Т. Беккер*[2,6], *А.М. Белостоцкий*[3,4,5,7], *Т.Б. Кайтуков*[2,5], *В.Н. Сидоров*[8]**

[1] ЗАО «ГОРПРОЕКТ», г. Москва, РОССИЯ
[2] Российская академия архитектуры и строительных наук, г. Москва, РОССИЯ
[3] Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, РОССИЯ
[4] ЗАО «Научно-исследовательский центр «СтаДиО», г. Москва, РОССИЯ
[5] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, РОССИЯ
[6] Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, РОССИЯ
[7] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, РОССИЯ
[8] Московский архитектурный институт (государственная академия), г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: В настоящей статье рассматриваются основные итоги состоявшегося в период с 15 по 23 августа 2016 года в г. Владивостоке на базе Дальневосточного федерального университета под эгидой Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) VI Международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений».

Ключевые слова: компьютерное моделирование, численное моделирование, конструкции, сооружения, программные комплексы, численные методы, симпозиум

ABOUT MAIN RESULTS OF THE SIXTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM “ACTUAL PROBLEMS OF COMPUTER SIMULATIONS IN CIVIL ENGINEERING”

***Vladimir I. Travush*[1,2,3], *Pavel A. Akimov*[2,3,4,5], *Alexander V. Baenkhaev*[6], *Alexander T. Bekker*[2,6], *Alexander M. Belostotsky*[3,4,5,7], *Taymuraz B. Kaytukov*[2,5], *Vladimir N. Sidorov*[8]**

[1] GORPROEKT Ltd., Moscow, RUSSIA
[2] Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, RUSSIA
[3] Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, RUSSIA
[4] Scientific Research Center “StaDyO”, Moscow, RUSSIA
[5] National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA
[6] Far Eastern Federal University, Vladivostok, RUSSIA
[7] Perm National Research Polytechnic University, Perm, RUSSIA
[8] Moscow Institute of Architecture (State Academy)

Abstract: The distinctive paper is devoted to main results of the Sixth International Symposium “Actual Problems of Computer Simulations in Civil Engineering”, which took place in the period from 15 to August 23, 2016 in Vladivostok at Far Eastern Federal University under the auspices of the Russian Academy of Architecture and Computer Sciences.

Key words: computer simulation, numerical simulation, structures, software, numerical methods, symposium



Рисунок 1. Кампус Дальневосточного федерального университета (панорамный вид).

1. ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

С 15 по 23 августа 2016 года в г. Владивостоке на базе Дальневосточного федерального университета (ДВФУ, рис. 1) под эгидой Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) состоялся VI Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» [1,2] (основные организаторы – член-корреспондент РААСН, проф., д.т.н. А.Т. Беккер; доц., к.т.н. А.В. Баенхаев).

От РААСН в работе Симпозиума принимали участие вице-президент РААСН, академик РААСН, проф., д.т.н. В.И. Травуш; вице-президент РААСН, академик РААСН, проф., д.т.н. В.А. Ильичев; академик-секретарь Отделения строительных наук РААСН, академик РААСН, проф., д.т.н. Н.И. Карпенко; академик РААСН, проф., д.т.н. П.А. Аббасов; академик РААСН, проф., д.т.н. Л.С. Ляхович; академик РААСН, проф., д.т.н. С.В. Федосов; главный ученый секретарь РААСН, член-корреспондент РААСН, проф., д.т.н. П.А. Акимов; председатель Дальневосточного территориального отделения РААСН, член-корреспондент РААСН, проф., д.т.н. А.Т. Беккер, член-корреспондент РААСН, проф., д.т.н. А.М. Белостоцкий; член-корреспондент, проф., д.т.н. РААСН С.В. Вавренюк; член-корреспондент РААСН, проф., д.т.н. Л.В. Енджиевский; иностранный член, проф., д.т.н. РААСН С.Н. Леонович (Беларусь); советник РААСН, проф., д.т.н. В.Н. Сидоров; заместитель главного ученого секретаря РААСН, советник РААСН, доц., к.т.н. Т.Б. Кайтуков; советник РААСН, проф., д.т.н. Т.Л. Дмитриева; советник РААСН, проф., д.т.н. Г.Г. Кашеварова; советник РААСН, проф., д.т.н. С.Б.Крылов; советник РААСН, доцент, к.т.н. В.Д. Малюк; советник РААСН, проф., к.арх. В.И. Смотриковский и др. (рис. 2-10).



Рисунок 2. Открытие VI Международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (слева-направо: А.А. Фаткулин, И.Н. Ковалев, А.Т. Беккер, В.И. Травуш, В.Н. Сидоров, В.А. Ильичев, П.А. Акимов).

Соорганизаторами этого крупного научного форума выступили Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Акционерное общество «Научно-исследовательский центр «Строительство» (АО «НИЦ «Строительство»); закрытое акционерное общество «Научно-исследовательский центр СтаДиО» (ЗАО НИЦ СтаДиО), спонсорскую поддержку оказали SCAD Soft, ООО «Лира сервис», КАД-ФЕМ Россия, ТЕСИС, ООО «Тримбл РУС», ЗАО НИЦ СтаДиО. Симпозиум, объединяющий ученых академических институтов и университетов с практикующими специалистами, занятыми в проектировании, расчетном обосновании и строительстве, и поддерживающий тем самым баланс между теоретическими аспектами моделирования и их приложениями. Мероприятие собрало рекордное число участников (более 140 человек (в том числе 30 человек приняли заочное участие)) – ученых и специалистов в области численного и компьютерного моделирования поведения строительных конструкций, зданий, сооружений и комплексов из многих регионов Российской Федерации, а также из Белоруссии, Вьетнама, Ирана, Казахстана, Польши, Украины и других стран. В частности, были представлены города Москва, Санкт-Петербург, Владивосток, Воронеж, Вроцлав, Екатеринбург, Иваново, Киев, Комсомольск-на-Амуре,



Рисунок 3. Знакомство с научно-исследовательскими подразделениями ДВФУ.

Корсаков, Красноярск, Макеевка, Минск, Новосибирск, Орел, Пермь, Самара, Саранск, Томск, Тула, Уфа, Хабаровск и Челябинск.

2. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ, ПЛАН ПРОВЕДЕНИЯ И МЕРОПРИЯТИЯ СИМПОЗИУМА

Основные научные направления Шестого Международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» перечислены ниже.

1. Моделирование жизненных циклов конструкций, зданий, сооружений и комплексов на стадиях их возведения, нагружений, сопротивляемости прогрессирующему разрушению.
2. Нелинейные модели материалов, конструкций зданий и сооружений при проектировании, оптимизации и реконструкции.
3. Материалы и конструкции в нестационарных физических условиях при сложных воздействиях.
4. Моделирование нагрузок и воздействий на строительные конструкции, здания, сооружения и комплексы. Задачи аэро- и гидроупругости.
5. Моделирование повреждаемости и разрушения конструкций. Математические модели в системах мониторинга зданий и сооружений.



Рисунок 4. Выступает академик РААСН В.И. Травуш.

6. Возможности современных программных средств при анализе и проектировании строительных объектов. Решатели в задачах строительной механики. Проблемы и перспективы.
7. Разработка, исследование и развитие численных и численно-аналитических методов расчета конструкций, зданий, сооружений и комплексов.

Программа симпозиума традиционно включала пленарные и секционные доклады; семинары для обсуждения актуальных проблем и достижений в области компьютерного моделирования конструкций, зданий, сооружений и комплексов; сообщения об опыте использования современных методов и средств компьютерного моделирования при проектировании и расчетном обосновании уникальных зданий, сооружений и комплексов (стадионы к Чемпионату мира по футболу 2018 года, высотные здания и др.); мастер-классы по использованию программных продуктов ведущих отечественных и мировых разработчиков систем компьютерного моделирования конструкций, зданий, сооружений и комплексов. В дни работы Симпозиума были проведены заседания Дальневосточного территориального отделения (ДТО) РААСН и Научного совета РААСН «Программные средства в строительстве и архитектуре».

Симпозиум проводился в кампусе ДВФУ в г. Владивосток. Кампус ДВФУ расположенный на берегу бухты Аякс на о. Русский, был построен в 2012 году к Саммиту АТЭС и содержит всю инфраструктуру для проведения международных мероприятий самого высокого уровня (рис. 1).



Рисунок 5. Выступает академик РААСН Л.С. Ляхович.

3. НАУЧНАЯ ПРОГРАММА СИМПОЗИУМА

С приветственным словом к участникам Симпозиума обратились: вице-губернатор Приморского края по вопросам образования, реализации научных, научно-технических и инновационных программ и проектов, записи актов гражданского состояния, культуры и молодежной политики И.Н. Ковалев; проректор по науке и инновациям Дальневосточного федерального университета А.А. Фаткулин; вице-президент Российской академии архитектуры и строительных наук В.И. Травуш; председатель Научного Совета Российской академии архитектуры и строительных наук «Программные средства в строительстве и архитектуре» В.Н. Сидоров;
- главный ученый секретарь Российской академии архитектуры и строительных наук П.А. Акимов; директор Инженерной школы Дальневосточного федерального университета А.Т. Беккер.

На пленарном заседании были сделаны следующие доклады: «Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. К 25-летию НИЦ СтаДиО» (докладчик – А.М. Белостоцкий); «Моделирование запроектных воздействий при исследовании жизненного цикла конструкций» (докладчик – проф., д.т.н. М.С. Барабаш (Украина)); «OMA Study Of Christ The King Monument» ((докладчик – проф., д.т.н. З. Вуйчицки (Wójcicki Z.R.; Польша)); «Расчетный анализ систем с наследуемым НДС» (докладчик – проф., д.т.н. О.В. Кабанцев); «Пути решения проблем качественной профессиональной подготовки инженеров в области анализа и проектирования строительных конструкций на примере заочно-дистанционной програмы магистратуры SCAD SOFT» (докладчик – Н.В. Мосина); «Моделирование динамики и прочности металлоконструкций мобильной башни



Рисунок 6. Выступает академик РААСН В.А. Ильичев.

обслуживания космодрома «Восточный» (докладчик – к.т.н. Д.С. Михалюк); «К проблеме моделирования морозной деструкции бетонов в конструкциях» (докладчик – А.Т. Беккер); «Информационное моделирование зданий как необходимый эволюционный виток развития технологии строительства» (докладчик – Д.В. Купцов); «SIMULIA Abaqus. Расширение возможностей моделирования строительных конструкций и сооружений» (докладчик – к.т.н. Д.В. Нуштаев).

В остальном программа Симпозиума, включавшая 87 докладов, была разделена на две секции: «Теоретические основы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Секция №1; сопредседатели: Акимов П.А.; Вуйчицки З.Р., проф., д.т.н. Лалин В.В.), «Автоматизированные программные комплексы в строительной отрасли. Расчеты конструкций» (Секция №2; сопредседатели: Белостоцкий А.М.; советник РААСН, проф., д.т.н. Гайджуров П.П.; Дмитриева Т.Л.); «Проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Секция №3; сопредседатели: Енджиевский Л.В.; Кашеварова Г.Г., Крылов С.Б.); «Материалы и конструкции в нестационарных условиях. Динамика конструкций» (Секция №4; сопредседатели: Федосов С.В.; Кабанцев О.В.; проф., д.т.н. Тяпин А.Г.).

Актуальным вопросам численного и численно-аналитического моделирования ветровых нагрузок, напряженно-деформированного состояния и прочности строительных конструкций, зданий, сооружений и комплексов, в том числе в связанных постановках, были посвящены презентации П.А. Абакумова, В.В. Адищева, П.А. Акимова, П.Д. Арленинова,



Рисунок 7. Дискуссия на кофе-брейке (слева – направо: Л.С. Ляхович, Н.И. Карпенко, В.Н. Сидоров, З. Вуйчицки, Т.Б. Кайтуков).

В.А. Артамонова, И.Н. Афанасьевой, М.А. Барботько, А.Т. Беккера, В.А. Белова, А.М. Белостоцкого, Е.И. Бознякова, С.А. Вальгер, В.Ф. Васкалова, В.В. Вершинина, Г.Г. Кашеваровой, Ю.Д. Гераймовича, М.С. Грачевой, Г.Н. Гусева, М.Н. Данилова, С.В. Деордиева, Д.С. Дмитриева, И.Д. Евзерова, Т.Б. Кайтукова, Н.И. Карпенко, Л.В. Кима, А.А. Клюкина, Д.А. Кузнецовой, И.В. Кучеренко, И.Ю. Ланцовой, М.В. Лазнюк, В.В. Лалина, И.И. Лалиной, О.Н. Любимова, Л.С. Ляховича, А.С. Мартиросяна, Д.В. Марченко, Нгуен Тай Нанг Лыонг, А.Р. Олуромби, А.С. Палова, К.Н. Пескова, А.А. Погорельцева, К.П. Пятикрестовского, С.В. Погудалиной, В.А. Пшеничкиной, Т.В. Сивовой, Ю.Л. Тонкова, В.И. Травуша, А.Г. Трапезникова, А.Г. Тяпина, А.Р. Усманова, Л.А. Фалалеевой, А.В. Федорова, Н.Н. Федоровой, Н.Я. Цимбельмана, А.Ю. Чаускина, Т.И. Черновой, И.Н. Шардакова, А.П. Шестакова, А.Б. Шмидта, С.В. Щербины.

Возможности (в том числе новые) современных программных комплексов для расчета, проектирования и информационного моделирования строительных и иных объектов (АСТРА-НОВА, Лира, Лира-САПР, СТАДИО, ANSYS, SIMULIA Abaqus, Autodesk Revit, COMPASS, DIANA, NASTRAN, SCAD, SOLIDWORKS, TEKLA), реализованные в их рамках численные модели, а также некоторые наукоемкие приложениях были представлены в выступлениях П.А. Акимова, В.Н. Алехина, А.А. Антипина, И.Н. Афанасьевой, А.М. Белостоцкого, В.С. Беляева, Е.И. Бознякова, С.А. Вальгер, В.В. Вершинина, П.П. Гайджурова, А.А. Гасанова, Ю.В. Гензерского, Ю.Д. Гераймович, В.В. Гладкого, Д.С. Горева, В.Ю. Грачева, Н.В. Дегтяревой, А.А. Дидух, Т.Л. Дмитриевой, Л.В. Енджиевского, Ю.Н. Жука, О.В. Кабанцева, Н.И. Карпенко, В.Н. Кашпура, Л.В. Кима, А.В. Колесникова, Д.В. Конина,



Рисунок 8. Знакомство с кампусом ДВФУ (слева – направо: Т.Л. Дмитриева и С.В. Федосов).

С.М. Кониной, А.С. Крылова, С.Б. Крылова, И.Ю. Ланцовой, С.Н. Леоновича, Д.В. Марченко, Д.С. Михалюка, А.П. Маяцкой, В.С. Михайлова, Н.В. Мосиной, О.А. Негрозова, Ю.В. Новожилова, Ю.В. Панасенко, Н.О. Петряшева, С.Б. Пенькового, К.О. Песина, С.О. Петряшева, А.Л. Потапенко, В.В. Потапова, Е.В. Прасоленко, М.С. Привалова, С.Ю. Привалова, О.А. Сабодаш, А.В. Соклакова, А.В. Теплых, В.И. Травуша, А.В. А.В. Федорова, Н.Н. Федоровой, Фроловской, Н.Я. Цимбельмана, Т.И. Черновой, Е.Е. Шалого, Г.И. Шапиро, С.В. Щербины.

Реализации научно-обоснованного мониторинга уникальных, высотных и ответственных зданий, сооружений и комплексов предлагались в докладах П.А. Акимова, А.М. Белостоцкого, О.С. Горячевского, Д.С. Дмитриева, Ю.Н. Дядченко, Д.К. Каличавы А.И. Нагибовича, О.А. Негрозова, К.И. Островского, Н.О. Петряшева, С.О. Петряшева, Ю.В. Пономарчука, Н.С. Сазонова, В.В. Сурица, В.И. Травуша, А.Р. Усманова, А.А. Холодилова, И.Н. Шардакова, С.В. Щербины,

Проблемы разработки, исследования, развития и верификации аналитических и численно-аналитических (в частности, дискретно-континуальных) методов решения задач строительной механики, механики деформируемого твердого тела и математической физики рассматривались в выступлениях П.А. Акимова, Моджтаба Аслами, В.В. Лалина, И.И. Лалиной, С.М. Мацкевича, М.Л. Мозгалевой, О.А. Негрозова, А.В. Савченко, В.Н. Сидорова.

Проблемам расчетно-экспериментальных исследований были посвящены доклады М.Л. Бартоломея, В.В. Вершинина, Г.Н. Гусева,

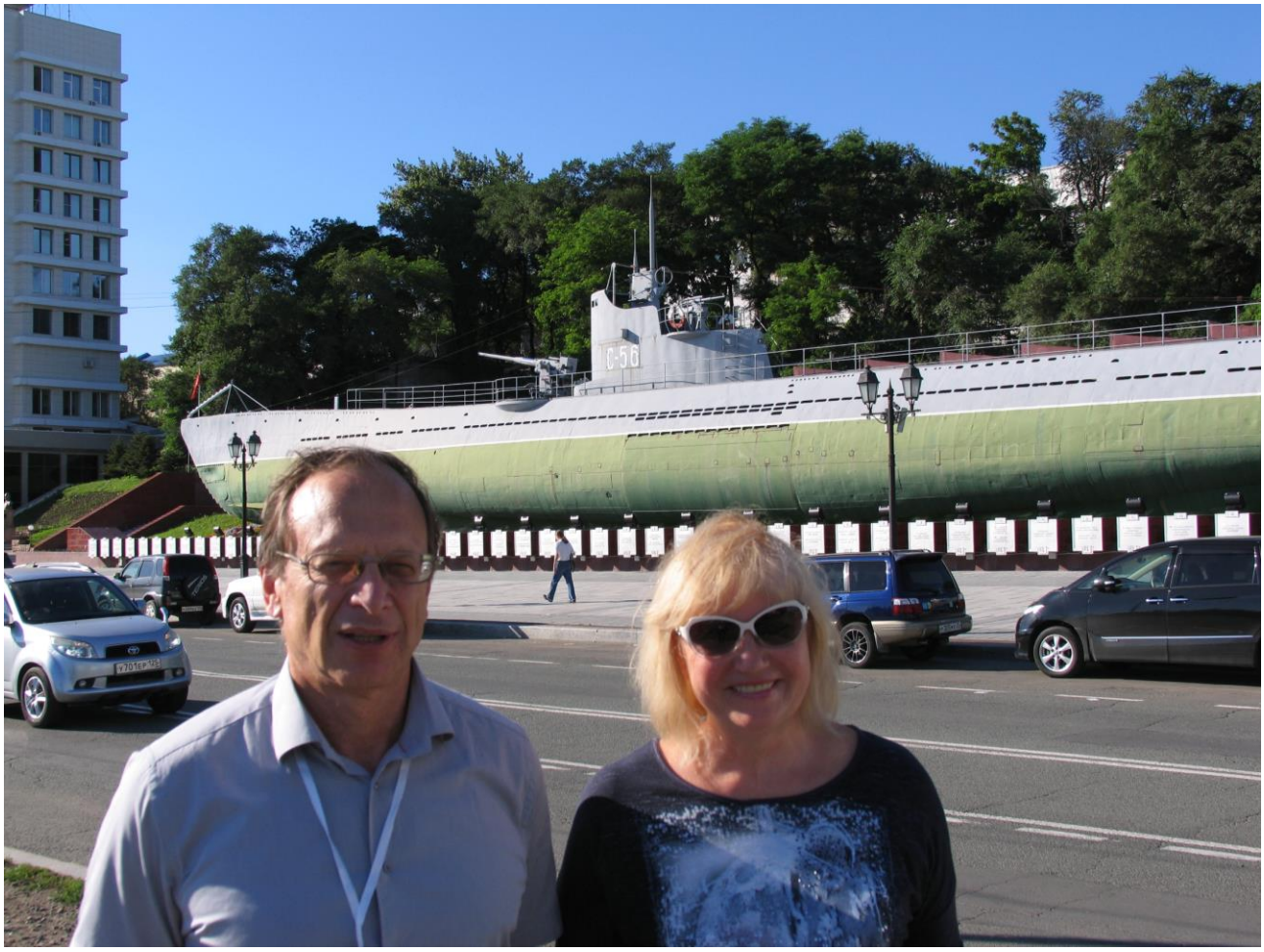


Рисунок 9. Экскурсия по Владивостоку (слева – направо: А.М. Белостоцкий и Г.Г. Кашеварова).

Г.Г. Кашеваровой, Р.В. Цветкова, И.Н. Шардакова, А.П. Шестакова.

Вопросы, связанные с подготовкой кадров (в том числе высшей квалификации) в области строительства и жилищно-коммунального хозяйства затрагивались в презентациях М.И. Бальзанникова, Д.С. Приворотского, Е.В. Приворотской, М.А. Спрыжкова.

Большой интерес участников симпозиума вызвали сообщения А.М. Белостоцкого и его коллег (А.А. Аул, Д.С. Дмитриев, А.И. Нагибович, К.И. Островский, А.С. Павлов, Ю.Н. Дядченко, С.В. Щербина) об опыте использования современных методов и средств компьютерного моделирования при проектировании и расчётном обосновании уникальных зданий и сооружений (стадионы Чемпионата мира по футболу 2018 года и др.).

4. СЕМИНАРЫ И МАСТЕР-КЛАССЫ

В рамках симпозиума было проведено девять семинаров, вызвавших неподдельный интерес участников симпозиума: «Инновации в условиях глобальных вызовов, временной фактор, механизмы управления, доктрина градоустройства и расселения (стратегическое планирование городов и территорий)» (Семинар №1, ведущий – В.А. Ильичев); «Оптимальное проектирование строительных конструкций» (Семинар №2, ведущий – Л.С. Ляхович); «Методы расчета высотных зданий и сооружений из монолитного железобетона» (Семинар №3, ведущий – В.И. Травуш); «Технологическая механика грунтов – ответ на вопросы масштабного подземного строительства» (Семинар №4, ведущий – В.А. Ильичев); «Современные методы расче-



Рисунок 10. Выступление А.Т. Беккера на заседании Дальневосточного территориального отделения РААСН.

та железобетонных конструкций» (Семинар №5; ведущий – Н.И. Карпенко); «Нелинейные модели поведения бетона в SIMULIA Abaqus» (Семинар №6; ведущий – Д.В. Нуштаев); «Численное моделирование в расчетном обосновании уникальных зданий и сооружений» (Семинар №7; ведущий – А.М. Белостоцкий); «История аварий и катастроф» (Семинар №8; ведущий – Л.В. Енджиевский); «Проектирование строительных конструкций с применением ПК семейства ЛИРА-САПР, СТАРК и Текла: версии 2016 года и их развитие в рамках BIM-технологий» (организаторы – ООО «Лира сервис», ООО «ЕВРОСОФТ», ООО «Тримбл РУС»).

В рамках симпозиума было проведено четыре мастер-класса: «Расчет и проектирование конструкций в среде SCAD Office 21» (Мастер-класс №1; организатор – ООО НПФ «СКАД СОФТ»); «Новые возможности и функции ПК ЛИРА-САПР 2016» (Мастер-класс №2; организатор – ООО «Лира сервис»); «Знакомство с SIMULIA Abaqus: Базовые навыки моделирования» (Мастер-класс №3; организатор – ООО «ТЕСИС»); «Возможности ПК ЛИРА-САПР 2016 и препроцессора ПК САПФИР 2016, ПК СТАРК 2016» (Мастер-класс №4, организаторы – ООО «Лира сервис», ООО «ЕВРОСОФТ»).

Особо следует отметить традиционно высокое представительство молодых ученых и специалистов (рис. 11-13).



Рисунок 11. Н.О. Петряшев и С.О. Петряшев на фоне моста на остров Русский.

5. ЗАСЕДАНИЕ НАУЧНОГО СОВЕТА РААСН «ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И АРХИТЕКТУРЕ».

17 августа 2016 года в ДВФУ состоялось заседание Научного Совета РААСН «Программные средства в строительстве и архитектуре» (председатель – советник РААСН, проф., д.т.н. В.Н. Сидоров (Московский архитектурный институт (государственная академия), МАрхИ), ответственный секретарь – советник РААСН, доц. к.т.н. Т.Б. Кайтуков (НИУ МГСУ, РААСН)).

В задачи Научного совета традиционно входит обсуждение и решение задач, а также выработка рекомендаций по актуальным вопросам научно-исследовательской, научно-технической, проектно-конструкторской, а также образовательной деятельности в области компьютерного моделирования работы зданий и сооружений. К числу научных вопросов, рассматриваемых Научным советом, в частности, относятся следующие: моделирование взаимодействия сооружений с грунтовым основанием; учет физической, геометрической и других нелинейностей; учет конструктивных и технологических особенностей сооружения; компьютерное материаловедение; моделирование ветровых нагрузок; расчет на сейсмические воздействия; расчет на вибрационные воздействия; расчет на прогрессирующее обрушение; совершенствование и разработка численных и численно-аналитических методов расчета конструкций и сооружений и др. Научным советом рассматриваются также вопросы в области экспертизы расчетов зданий и сооруже-



Рисунок 12. Коллективная фотография молодых участников Симпозиума у Центра мониторинга моста на остров Русский.

ний с использованием программных комплексов (квалификационная проверка и аттестация специалистов; экспертиза и верификация программных средств; экспертиза расчетов ответственных зданий и сооружений).

Исторически, одной из основных задач почти сразу после основания Научного совета в 2005 году стало проведение верификации программных комплексов, используемых российскими проектными, конструкторскими и научно-исследовательскими организациями для выполнения расчетов с целью оценки прочности и живучести строительных конструкций и сооружений. Целью верификации программных комплексов в РААСН является определение состава их возможностей по таким аспектам, как правомерность и точность математических моделей конструкций, элементов, узлов и др., реализуемых в программных комплексах (валидация), точность численного решения (в сравнении с аналитическими решениями, результатами эксперимента, решениями с использованием других программных средств), наличие и достаточность математического обоснования реализованных конечных элементов и методов решения различных задач, представительность библиотеки конечных элементов, перечень реализованных в программных комплексах нормативов, быстродействие программ, ограничения на количественные параметры комплексов (число узлов, элементов, определяемых собственных частот и форм и др.), возможность решения нелинейных задач (в том числе, моделирующих трение, проскальзывание, конструктив-



Рисунок 13. Морская прогулка. Вид на мост через бухту Золотой рог.

ную и физическую нелинейность, нелинейные динамические эффекты и др.), возможность моделирования специальных режимов, например, процесса возведения сооружения, возможность расчета большепролетных, высотных и других сложных конструкций и др., оценить слабо формализуемые характеристики программных средств по таким аспектам, как удобство интерфейса, возможность и удобство внедрения в ПС современных научных результатов. При этом в задачи по верификации программных комплексов входит выявление соответствия действительных возможностей программных декларациям разработчиков, определение правильности решения верификационных задач, выявление и оценка погрешности расчета параметров путем сравнения с экспериментальными данными, расчетными данными, полученными по другим программным комплексам, результатами аналитических тестов, теоретического анализа и обоснование возможности использования программных комплексов в заявленной области применения.

Все вышеперечисленное предопределило повестку дня заседания Научного Совета, основным вопросом которой стала верификация в системе РААСН программного комплекса «ЛИРА 10.х» (докладчик – проф., д.т.н. И.Д. Евзеров (ООО «ВЕГА КАД», г. Киев, Украина).

6. ПУБЛИКАЦИИ

На основании материалов, подготовленных участниками симпозиума в ДВФУ был издан сборник тезисов докладов. Программный

комитет симпозиума рекомендовал наиболее значимые и интересные доклады к изданию в перечисленных ниже рецензируемых научных журналах.

1. *Международный научный журнал "International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций)" (IJCCSE)*. Журнал входит в актуальный 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; по результатам многоуровневой экспертизы журнал был отобран для проекта RUSSIAN SCIENCE CITATION INDEX и вошел в Перечень, включающий 650 российских научных журналов, которые соответствуют требованиям Web of Science и будут размещены на этой платформе, имеют значительную научную ценность, как для российского научного сообщества, так и для зарубежных ученых.

2. *Научный электронный журнал «Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета»*. Журнал входит в международные базы данных Ulrich's Periodicals Directory (Каталог периодических изданий Ульриха, США), крупнейший мировой ресурс EBSCO Publishing (США), российские научные БД научного цитирования: РИНЦ – Российский индекс научного цитирования (eLIBRARY.RU), ВИНИТИ – Всероссийский институт научной и технической информации Российской академии наук. Журнал зарегистрирован в Международном центре ISSN (ISSN 2227-6858) и «Роскомнадзор» (свидетельство Эл №ФС77-54742). Редакционная коллегия журнала ведет подготовительную работу по вхождению в базу данных Scopus и Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ.

7. ПЛАНЫ НА БУДУЩЕЕ

Уже принято решение о том, что следующий, Седьмой Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» состоится в июне-августе 2018 года в г. Новосибирске на базе Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета /НГАСУ/ (Сибстрин). С краткой презентацией о НГАСУ (Сибстрин) на процедуре закрытия VI Международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» выступила проф., д.ф.-м.н. Н.Н. Федорова. Надеемся увидеть читателей журнала «International Journal for Computational Civil and Structural Engineering» среди участников грядущего научного форума 2018 года!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Травуш В.И.** Об истории и основных итогах V международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». // Строительная механика и расчет сооружений, 2014, №5, с. 2-7.
2. **Травуш В.И., Акимов П.А., Белостоцкий А.М., Дмитриева Т.Л., Сидоров В.Н.** Об истории и основных итогах Пятого международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 10, Issue 3, 2014, pp. 176-183.

Травуш Владимир Ильич, академик РААСН, доктор технических наук, профессор; вице-президент Российской академии архитектуры и строительных наук; заместитель генерального директора ЗАО «ГОРПРОЕКТ», г. Москва, наб. Академика Туполева, д. 15, корп. 15, этаж 5; тел. +7 (495) 500-55-81;
e-mail: travush@mail.ru

Акимов Павел Алексеевич, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук; главный ученый секретарь РААСН; заместитель генерального директора по науке ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО», профессор кафедры прикладной математики Национального исследовательского Московского

государственного строительного университета (НИУ МГСУ); 107031, г. Москва, ул. Большая Дмитровка, д. 24, стр. 1; тел. +7(495) 625-71-63; факс +7 (495) 650-27-31; e-mail: akimov@raasn.ru, pavel.akimov@gmail.com.

Баенхаев Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидротехники, теории зданий и сооружений, Дальневосточный федеральный университет; 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, корпус С, каб. Е918; тел. +7(423) 223-00-36; e-mail: baenkhaev.av@dvfu.ru.

Беккер Александр Тевьевич, член-корреспондент РААСН, профессор, доктор технических наук, директор Инженерной школы, Дальневосточный федеральный университет; председатель Дальневосточного территориального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук; 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, корпус С, С634, тел. +7 (423)26-24-24, доб. 22-03; bekker.at@dvfu.ru.

Белостоцкий Александр Михайлович, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО», профессор кафедры прикладной математики, заместитель директора Научно-образовательного центра компьютерного моделирования Национального исследовательского Московского государственного строительного университета; 125040, Россия, г. Москва ул. 3-я Ямского Поля, д.18, 8 этаж, офис 810, тел. +7 (495) 706-88-10, e-mail: stadyo@stadyo.ru, niccm@mgsu.ru.

Кайтуков Таймураз Батразович, советник РААСН, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, заместитель главного ученого секретаря Российской академии архитектуры и строительных наук; Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; тел/факс: +7 (499) 183-59-94; e-mail: tkaytukov@gmail.com.

Сидоров Владимир Николаевич, советник РААСН, профессор, доктор технических наук, Московский архитектурный институт (государственная академия), кафедра высшей математики и строительной механики, 107031, Россия, г. Москва, ул. Рождественка, дом 11/4, корп. 1, стр. 4; e-mail: sidorov.vladimir@gmail.com.

Vladimir I. Travush, Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Dr.Sc., Vice-President of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; Vice 24/1, ul. Bolshaya Dmitrovka, Moscow, 129337, Russia; e-mail: travush@mail.ru

Pavel A. Akimov, Corresponding Member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, PhD, Professor, Executive Scientific Secretary of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; StaDyO Research & Engineering Center; Department of Applied Mathematics, Moscow State University of Civil Engineering; 24, Ul. Bolshaya Dmitrovka, 107031, Moscow, Russia; phone +7(495) 625-71-63; fax: +7 (495) 650-27-31; e-mail: akimov@raasn.ru, pavel.akimov@gmail.com.

Alexander V. Baenkhaev, Ph.D., Associate Professor, Department of Hydraulic Engineering, the theory of buildings and structures, Far Eastern Federal University, Ajax St., Vladivostok, Russky Island, 690922, Russia; phone +7(423) 223-00-36; e-mail: baenkhaev.av@dvfu.ru.

Alexander T. Bekker, Corresponding Member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dr.Sc, Professor, Director, School of Engineering, Far Eastern Federal University, Ajax St., Vladivostok, Russky Island, 690922, Russia; phone +7 (423)26-24-24, add. 22-03; bekker.at@dvfu.ru.

Alexander M. Belostotsky, Corresponding Member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Dr.Sc, Professor, Vice Director of StaDyO Research & Engineering Center; Science Director of Research & Education Center of Computation Simulation, Department of Applied Mathematics, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia; phone/fax: +7 (499) 929-50-17; e-mail: stadyo@stadyo.ru, niccm@mgsu.ru.

Taymuraz B. Kaytukov, Advisor of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, PhD, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, National Research Moscow State University of Civil Engineering; Vice Executive Scientific Secretary of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia, phone/fax: +7(499) 183-59-94, e-mail: tkaytukov@gmail.com.

Vladimir N. Sidorov, Professor, Dr.Sc., Department of Advanced Mathematics and Structural Mechanics; Moscow Institute of Architecture (State Academy); 11/4, Building 4, Ulitsa Rozhdestvenka, Moscow, 107031, Russia; e-mail: sidorov.vladimir@gmail.com

DOI:10.22337/1524-5845-2016-12-3-145-150

FILTRATION OF FORWARD AND BACK FLOW OF SUSPENSION IN POROUS MEDIA

Ludmila I. Kuzmina[1], Yuri V. Osipov[2]
[1] National Research University Higher School of Economics, Moscow, RUSSIA
[2] Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

Abstract: Filtration problem of suspension with identical particles in a porous medium is considered. Physical and mathematical models for size-exclusion capture mechanism of suspended particles at the inlet of filter pores are presented. An exact solution is constructed for the forward and back flow of suspension in a porous medium in case of linear filtration coefficient.

Keywords: suspension, porous medium, filtration problem, filtration coefficient, size-exclusion capture mechanism, forward and back flow, exact solution

ФИЛЬТРАЦИЯ ПРЯМОГО И ОБРАТНОГО ПОТОКА СУСПЕНЗИИ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Л.И. Кузьмина[1], Ю.В. Осипов[2]
[1] Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, РОССИЯ
[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: Рассматривается одна из задач подземной гидромеханики - фильтрация суспензии в пористой среде. Приводятся физические и математические модели движения потока одинаковых частиц для геометрического механизма захвата частиц порами фильтра. Построено аналитическое решение задачи фильтрации обратного потока для линейного коэффициента фильтрации.

Ключевые слова: суспензия, пористая среда, задача фильтрации, коэффициент фильтрации, геометрический механизм захвата частиц, прямой и обратный поток, аналитическое решение

1. INTRODUCTION

Filtration of suspension in a porous medium is an important factor in the design and construction of tunnels, underground and hydraulic structures, wastewater and water cleaning systems [1, 2]. The porous medium is a solid body with pores - channels of complex shape. Suspension is a fluid with small suspended solid particles. Transport and retention of particles in the filter is a physical rather than a chemical process, since the particles are not dissolved in the fluid and form a slurry. Here we study deep bed filtration – the process of long-term depth filtration. This means that filtering takes place all over the filter, not only in its surface layer. The process is slow; it goes smoothly and lasts for a long time. The flow of suspension in forward and reverse directions corresponds to the pollution and cleaning of the filter.

2. PHYSICAL MODEL OF FILTRATION IN POROUS MEDIA

The porous medium or the filter has a complex internal structure. Pores are channels of various shapes and widths. Some pores intersect, and

other have dead end. For modeling the transport of particles through porous media only those pores that connect the inlet and outlet of the filter are considered. Assume that the filter has relatively large voids – the so-called mixing chambers connected by many pores of different size and width. The suspended particles moving along the individual pores are mixed in the chambers. Then the particles are transported by fluid flow from one chamber to another through randomly chosen pores (see Fig. 1). Part of the particles pass through a filter, and some part get stuck in the pores.

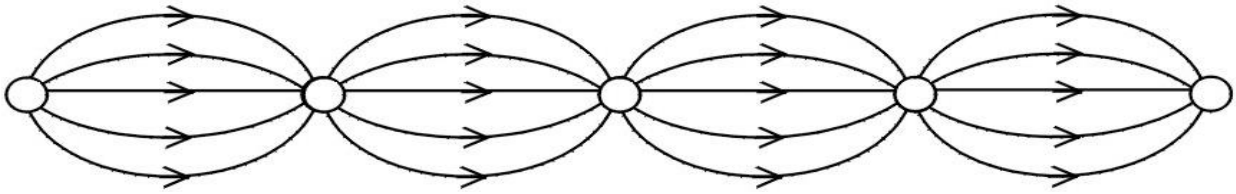


Figure 1. The diagram of the particle transport in a porous medium.

This model considers only mechanical-geometrical mechanism of particle capture ignoring viscosity and electrostatic forces. It is assumed that each pore has a cross-section of constant diameter, and all particles are identical. The flow of fluid brings a particle in the mixing chamber to the pore inlet. If the particle size is less than the pore diameter the particle freely enters the pore and the fluid flow transports it to the next chamber. If a particle is larger than the pore, it is stuck at the pore inlet. The pore is clogged and the suspension flow through the pore stops. It is assumed that the clogged particle can not be knocked out of the pore by fluid flow or by other particles, and remains permanently in the filter. Such particles form a deposit.

The porous medium is characterized by pore size distribution. We assume that pore distribution is constant in each cross-section of the filter. In order to characterize the filtering process concentrations of suspended and retained particles, i.e. their bulk densities – the amount of particles per unit volume of the porous medium are used.

At the initial moment the porous medium contains no particles. Particles of the suspension gradually fill the filter, moving from inlet to outlet. Fig. 2 a) shows the concentration front of suspended and retained particles moving in a porous medium. In fig. 2 b) the concentration front reached the filter outlet and the particles are distributed throughout the whole porous medium.

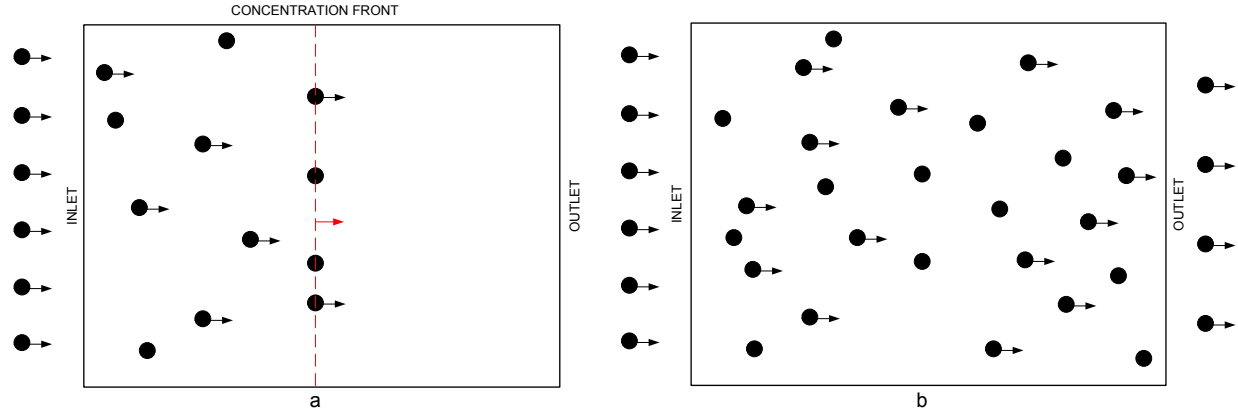


Figure 2. Filter filled with particles a) Partially b) Fully.

Over time more and more small pores are clogged by particles. In the long-term almost all pores whose dimensions are smaller than the particles are clogged and suspension flows freely through the large pores without particle retention. At $t \to \infty$ the porous medium stops to retain particles. The concentration of the retained particles tends to the limiting value S_M, and the concentration of suspended particles does not change when moving with the fluid flow from the inlet to the outlet of the filter.

3. MATHEMATICAL MODEL OF FORWARD FLOW

One-dimensional transport of identical solid particles moving with fluid flow in the filter of unit length is considered. Concentrations $C(x,t)$, $S(x,t)$ of suspended and retained particles satisfy two equations. The first one is an analog of the equation of continuity and describes the law of conservation of suspended and retained particle mass

$$\frac{\partial (C+S)}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial x} = 0 . \qquad (1)$$

(The term $\frac{\partial S}{\partial x}$ is absent due to the immobility of the deposit).

The second equation describes the growth of the deposit

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \Lambda(S) C . \qquad (2)$$

The rate of deposit growth is proportional to the concentration of suspended particles $C(x,t)$ in the suspension. The proportionality coefficient $\Lambda(S)$ called filtration coefficient depends on $S(x,t)$, i.e. on the amounts of clogged small pores. (With increasing S the filtration coefficient should decrease).

Equations (1), (2) form a quasi-linear hyperbolic system which is treated in the domain

$$\Omega = \{0 < x < 1,\ t > 0\} .$$

The boundary conditions are placed at the filter inlet $x = 0$ and at the initial time $t = 0$. It is assumed that the suspension supplied to the filter inlet has a constant concentration of suspended particles

$$C(x,t)\big|_{x=0} = 1 ; \qquad (3)$$

and initially the porous medium contains no particles

$$C(x,t)\big|_{t=0} = 0 ; \qquad (4)$$

$$S(x,t)\big|_{t=0} = 0 . \qquad (5)$$

Different number of conditions at $x = 0$ and $t = 0$ is due to the fact that the line $x = 0$ is the characteristics of equation (2) and $t = 0$ is not a characteristic line. The conditions (3) - (5) determine a unique solution of the system (1), (2).

Characteristics of equation (1) – the line $t = x$ defines the concentration front of suspended and retained particles. The front separating the filter part filled with particles and the free zone of porous medium moves with velocity $v = 1$. At the concentration front the solution $C(x,t)$ has a strong break (loss of continuity), and $S(x,t)$ has a weak break (the solution is continuous, but its derivative is discontinuous)

$$C(x,t) \begin{cases} = 0, & t < x \\ > 0, & t > x \end{cases}; \quad S(x,t) \begin{cases} = 0, & t < x \\ > 0, & t > x \end{cases}. \qquad (6)$$

The solution break is due to the inconsistency of boundary conditions (3) and (4) at the origin. It propagates along characteristics $t = x$. The solution becomes continuous at the moment $t = 1$ when the break reaches the end of the filter $x = 1$.

Filtration coefficient $\Lambda(S)$ satisfies the following conditions: it is continuous for $S \geq 0$;

$\Lambda(S) \geq 0$ for $S > 0$; $\Lambda(0) > 0$. Clogging of all small pores means that the function $\Lambda(S)$ has a positive root S_M. If $\Lambda(S)$ is smooth and $\Lambda(S) > 0$ for $0 \leq S < S_M$ then the solution $S(x,t)$ of the system (1)-(5) satisfies conditions $0 \leq S < S_M$, $\lim\limits_{t\to\infty} S(x,t) = S_M$, $\lim\limits_{t\to\infty} C(x,t) = 1$. In this case $\Lambda(S)$ is called a blocking filtration coefficient. S_M is the maximum limit concentration of retained particles formed when all the small pores are clogged.

For a linear blocking filtration coefficient

$$\Lambda(S) = a - bS,\ a > 0,\ b > 0 \qquad (7)$$

the exact solution of (1) - (5) is well known [3]

$$\Omega_1 : 0 < x < 1,\ 0 < t < x:\ \ C = 0,\ \ S = 0;$$

$$\Omega_2 : 0 < x < 1,\ x < t < 1:\ \ C = \frac{e^{b(t-x)}}{e^{b(t-x)} + e^{ax} - 1},$$

$$S = \frac{a}{b} \cdot \frac{e^{b(t-x)} - 1}{e^{b(t-x)} + e^{ax} - 1}. \qquad (8)$$

In general case the exact solution can be written in integral form [4]. The asymptotic solution of the filtration problem was constructed near the concentration front [5], near the filter inlet [6], for large values of time [7] and for a small limit deposit [8].

4. BACK FLOW

The problem discussed above deals with suspension flow from the filter inlet to the outlet. Suppose that at some moment the forward movement of the suspension is stopped and the pure fluid without suspended particles begins to flow in the opposite direction. The process of cleaning the porous medium filled by suspension by pure fluid (usually clean water), moving from the filter outlet to the inlet, satisfies the equation similar to (1) and eq. (2)

$$\frac{\partial (C+S)}{\partial t} - \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \qquad (9)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \Lambda(S) C. \qquad (10)$$

The boundary conditions for the back flow differ from the conditions (3) - (5). At the filter outlet the pure fluid is supplied

$$C(x,t)\big|_{x=1} = 0; \qquad (11)$$

and at the time $t = t_0$ the concentrations of suspended and retained particles are continuous and set by the solution $C_+(x,t)$, $S_+(x,t)$ of forward flow system (1) - (5)

$$t = t_0:\ C(x,t_0) = C_+(x,t_0),\ \ S(x,t_0) = S_+(x,t_0). \qquad (12)$$

The moment of flow direction change $t = t_0$ should be chosen not less than 1, because for time $t_0 < 1$ the length of the filter is actually reduced. Here, we assume $t_0 = 1$.

The front of pure fluid without particles moves in the opposite direction from the filter outlet to the inlet along the characteristics $t = 2 - x$. Behind the front remains pure water with fixed deposit $S^0(x)$ not depending on time. Before the fluid front the suspension is filtrated in porous medium. As in the case of forward flow, there is a strong break of $C(x,t)$ and a weak break of $S(x,t)$ at the fluid front. At time $t = 2$ pure water reaches the filter inlet and the concentration of suspended particles becomes zero throughout the whole filter (see Fig. 3).

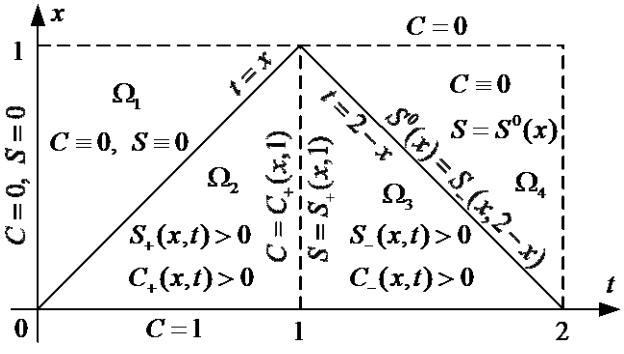


Figure 3. Solution diagram for the problem of forward and back flow.

For the linear filtration coefficient (7) analytical solution of the problem (9) - (12) has the form

$$\Omega_3: 0<x<1,\ 1<t<2-x \quad S(x,t)=\frac{a}{b}\left(1-\frac{M(x)e^{a\tau}}{ae^{a\tau}\int_x^{\tau}M(y)dy+M(\tau)\left(e^{b(1-\tau)}+e^{a\tau}-1\right)}\right)\Bigg|_{\tau=t+x-1} \tag{13}$$

$$C(x,t)=\frac{M(\tau)e^{b(1-\tau)-a\tau}}{a\int_x^{\tau}M(y)dy+M(\tau)\left(e^{b(1-\tau)-a\tau}-e^{-a\tau}+1\right)}\Bigg|_{\tau=t+x-1} \tag{14}$$

$$\Omega_4: 0<x<1,\ 2-x<t<2 \quad S^0(x)=S(x,2-x)=\frac{a}{b}\left(1-\frac{M(x)}{a\int_x^1 M(y)dy+1}\right);\ C=0, \tag{15}$$

where

$$M(x)=e^{\int_x^1\mu(z)dz}, \qquad \mu(x)=\frac{ae^{ax}+a-(a+2b)e^{b(1-x)}}{e^{b(1-x)}+e^{ax}-1}. \tag{16}$$

5. CONCLUSIONS

The paper deals with the physical and mathematical model of deep bed filtration for the forward and back flow of suspension in porous media, describing the processes of filter pollution and cleaning. In the case of linear blocking filtration coefficient an exact solution of the problem is constructed. The solution is discontinuous on the characteristics along which the fronts of the particles and pure fluid propagate. These results allow us to formulate a number of new problems requiring a numerical solution.

The periodic change of forward and back flows: at the time $t=2$, when the front of clean water reaches the filter inlet $x=0$, the suspension is supplied at the inlet again and the suspended particles begin to move forward. At $t=3$ the flow direction changes again, etc. It is required to determine the limit deposit concentration after many changes of flow direction.

Back flow with partial lifting of the deposit: at the time of the flow direction change the shock pressure wave passes through the filter at high speed. It picks up a part q of retained particles, turning it into a suspension again. As the speed of the pressure wave is much greater than the velocity of suspension, we can assume that the deposit lifting occurs simultaneously around the whole filter. It is required to determine the dependence of the particle concentrations during the periodic flow direction change on the fraction q of retained particles.

REFERENCES

1. **Bedrikovetsky P.** Mathematical theory of oil and gas recovery with applications to ex-USSR oil and gas fields, Kluwer Academic, Dordrecht, 1993.
2. **Noubactep C., Caré S.** Dimensioning metallic iron beds for efficient contaminant removal. // Chemical Engineering Journal, 163, 2010, pp. 454-460.
3. **Herzig J.P., Leclerc D.M., and Legoff P.** Flow of suspensions through porous media - application to deep filtration. // Industrial

and Engineering Chemistry, 1970, vol. 62(5), pp. 8-35.
4. **Vyazmina E.A., Bedrikovetskii P.G., Polyanin A.D.** New classes of exact solutions to nonlinear sets of equations in the theory of filtration and convective mass transfer. // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2007, vol. 41(5), pp. 556-564.
5. **You Z., Osipov Y., Bedrikovetsky P., Kuzmina L.** Asymptotic model for deep bed filtration. // Chemical Engineering Journal, 258(2014), pp. 374-385.
6. **Kuzmina L.I., Osipov Yu.V.** Particle transportation at the filter inlet. // International. Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2014, Volume 10, Issue 3, pp. 17-22.
7. **Kuzmina L.I., Osipov Yu.V.** Asymptotic model of filtration in almost stationary mode. // International. Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2016, Volume 12, Issue 1, pp. 158-163.
8. **Kuzmina L.I., Osipov Yu.V.** Asymptotic solution for deep bed filtration with small deposit, // Procedia Engineering, 2015, Volume 111, pp. 491-494.

Ludmila I. Kuzmina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics, 101000, Russia, Moscow, Myasnitskaya st., 20, tel. +7(495) 77295 90 * 15219, e-mail: lkuzmina@hse.ru.

Yuri V. Osipov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Computer Science, Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoe Shosse, 26, tel. +7(499)1835994, e-mail: yuri-osipov@mail.ru.

Кузьмина Людмила Ивановна, доцент, кандидат физико-математических наук, Департамент прикладной математики, Московский институт электроники и математики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»; 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20,
тел. +7(495) 77295 90*15219; e-mail: lkuzmina@hse.ru;

Осипов Юрий Викторович, доцент, кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего кафедрой информатики и прикладной математики Национального исследовательского Московского государственного строительного университета; 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26;
тел. +7(499)1835994; e-mail: yuri-osipov@mail.ru.

ИНФОРМАЦИЯ О КОНКУРСЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МИНИСТЕРСТВА СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК В 2017 ГОДУ

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российская академия архитектуры и строительных наук» (далее – РААСН), по поручению Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (далее – Минстрой России) (приказ Минстроя России от 12 декабря 2014 года №863/пр; приказ Минстроя России от 04 августа 2016 г. №547/пр) и в соответствии с решением Президиума РААСН (постановление президиума РААСН №7 от 01 июля 2016 года), объявляет конкурс на выполнение фундаментальных научных исследований (ФНИ) Минстроя России и РААСН в области архитектуры, градостроительства и строительных наук в 2017 году.

Конкурс Минстроя России и РААСН проводится по двум номинациям:

- для членов, советников и почетных членов РААСН, работников РААСН и подведомственных Минстрою России учреждений;
- для молодых ученых и специалистов в возрасте до 35 лет (в конкурсе имеют право участвовать персонально ученые и специалисты (или коллективы исследователей) – советники РААСН, работники РААСН и подведомственных Минстрою России учреждений, которым на момент окончания срока подачи заявки не исполнилось 35 лет).

Начало разработки и продолжительность представляемых на конкурс тем ФНИ:
Начало разработки представляемых на конкурс тем ФНИ – I квартал 2017 года, продолжительность – от одного до двух лет. Начало разработки представляемых на конкурс тем ФНИ для молодых ученых и специалистов – I квартал 2017 года, продолжительность – до девяти месяцев.

Условия конкурса:
Лица (граждане Российской Федерации), желающие участвовать в конкурсе, должны представить заявку (в том числе электронную версию заявки на CD и/или DVD диске) по адресу: 107031, Москва, ул. Большая Дмитровка, д. 24, стр. 1, в соответствующее отделение РААСН (архитектура, градостроительство, строительные науки) с пометкой: «На конкурсный отбор

фундаментальных научных исследований для членов, советников и почетных членов РААСН, работников РААСН и подведомственных Минстрою России учреждений» или «На конкурсный отбор фундаментальных научных исследований для молодых ученых и специалистов» в виде следующих документов:

1. Заявка на участие в конкурсном отборе на выполнение фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН;
1. Анкетные данные участника (участников) конкурсного отбора на выполнение фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН (для работников РААСН и подведомственных Минстрою России учреждений не требуются).
2. Дополнительные материалы: ◦ Сведения для формирования индикативного рейтинга заявки на выполнение фундаментального научного исследования;
    - Список публикаций в научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (Web of Science), изданных в период с 01.08.2014 по 31.07.2016 при авторстве или соавторстве научного руководителя или исполнителей заявляемого фундаментального научного исследования (в случае непредоставления данного списка считается, что соответствующие публикации за указанный период отсутствуют);
    - Список публикаций в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus, изданных в период с 01.08.2014 по 31.07.2016 при авторстве или соавторстве научного руководителя или исполнителей заявляемого фундаментального научного исследования (в случае непредоставления данного списка считается, что соответствующие публикации за указанный период отсутствуют);
    - Список публикаций в научных журналах, входящих в перечень, утвержденный Высшей аттестационной комиссией, изданных в период с 01.08.2014 по 31.07.2016 при авторстве или соавторстве научного руководителя или исполнителей заявляемого фундаментального научного исследования (в случае непредоставления данного списка считается, что соответствующие публикации за указанный период отсутствуют);
    - Список зарегистрированных патентов в Российской Федерации, полученных в период с 01.08.2014 по 31.07.2016 при авторстве или соавторстве научного руководителя или исполнителей заявляемого фундаментального научного исследования (в случае непредоставления данного списка считается, что соответствующие патенты за указанный период отсутствуют);
    - Список результатов интеллектуальной деятельности (включая секреты производства (ноу-хау), программы для ЭВМ, базы данных, изобретения, полезные модели, промышленные образцы), в том числе имеющих правовую охрану в Российской Федерации, созданных , созданных в период с 01.08.2014 по 31.07.2016 при авторстве или соавторстве научного руководителя или исполнителей заявляемого фундаментального научного исследования (в случае непредоставления данного списка считается, что соответствующие результаты интеллектуальной деятельности за указанный период отсутствуют);
    - Список зарегистрированных патентов за рубежом (в том числе в странах СНГ), полученных в период с 01.08.2014 по 31.07.2016 при авторстве или соавторстве научного руководителя или исполнителей заявляемого фундаментального научного исследования (в случае непредоставления данного списка считается, что соответствующие патенты за указанный период отсутствуют);
    - Список монографий, их переводов и научных словарей, имеющих международный книжный индекс ISBN, изданных период с 01.08.2014 по 31.07.2016 под ре-

дакцией, при авторстве или соавторстве научного руководителя или исполнителей заявляемого фундаментального научного исследования (в случае непредоставления данного списка считается, что соответствующие издания за указанный период отсутствуют).

- Смета расходов на выполнение заявляемого фундаментального научного исследования (рекомендуется к представлению).

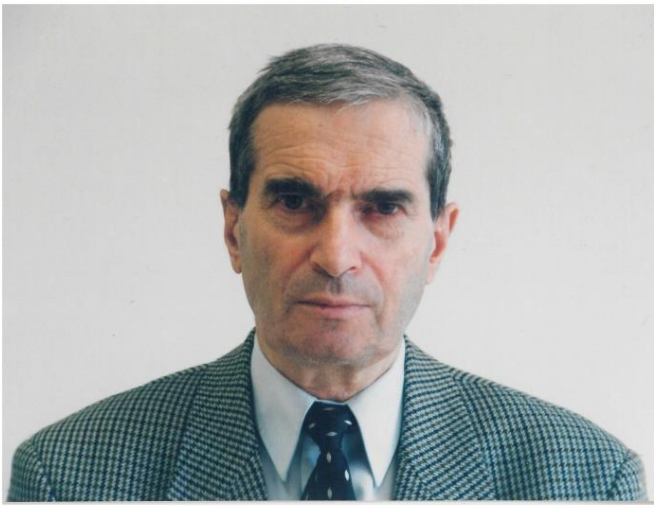
В конкурсе могут участвовать отдельные исследователи или исследовательские коллективы. Заявки от организаций не принимаются. Срок окончания подачи заявок на конкурс – до 15 часов 00 минут 30 сентября 2016 года (пятница) включительно (в том числе и для почтовых отправлений). Заявки, поступившие позже указанного срока, не рассматриваются. Мотивы отклонения поступивших заявок заявителям не сообщаются. Президиум РААСН оставляет за собой право определять количество тем фундаментальных научных исследований по объявленным номинациям, устанавливать объемы финансирования ФНИ в зависимости от содержания и количества поданных на конкурс заявок. Результаты конкурсного отбора на выполнение ФНИ Минстроя России и РААСН будут опубликованы на сайте РААСН (www.raasn.ru).

Контактная информация:
Отделение архитектуры РААСН:
Тел.: +7(495) 629-14-95, 625-76-84;
E-mail: oarch@raasn.ru
Отделение градостроительства РААСН:
Тел.: +7(495) 625-79-75, 629-65-26;
E-mail: grado@raasn.ru, raasngrado@yandex.ru, grado7@yandex.ru
Отделение строительных наук РААСН:
Тел.: +7(495) 650-77-83, 625-73-16;
e-mail: osn@raasn.ru, osn.raasn@mail.ru

Информационное обеспечение и регламентирующие документы (размещены на официальном интернет-сайте РААСН):

1. Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 12 декабря 2014 г. №863/пр «Об утверждении Положения о проведении конкурса тем на выполнение фундаментальных научных исследований и о порядке формирования плана фундаментальных научных исследований и государственных заданий федерального государственного бюджетного учреждения «Россий-ская академия архитектуры и строительных наук»;
2. Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 04 августа 2016 г. №547/пр «О внесении изменений в Положение о проведении конкурса тем на выполнение фундаментальных научных исследований и о порядке формирования плана фундаментальных научных исследований и государственных заданий федерального государственного бюджетного учреждения «Российская академия архитектуры и строительных наук», утвержденное приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федера-ции от 12 декабря 2014 г. №863/пр.;
3. Форма заявки на участие в конкурсном отборе на выполнение фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН;

4. Форма анкетных данных участника (участников) конкурсного отбора на выполнение фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН (для работников РААСН и подведомственных Минстрою России учреждений не требуются);
5. Показатели индикативного рейтинга заявки на выполнение фундаментального научного исследования, утвержденные постановлением Президиума Российской академии архитектуры и строительных наук от 01 июля 2016 года, №7;
6. Рекомендации по реализации Положения о проведении конкурсного отбора тем фундаментальных научных исследований и о порядке формирования плана фундаментальных научных исследований и проектов государственных заданий федеральным государственным бюджетным учреждением «Российская академия архитектуры и строительных наук» в 2016 году, утвержденные постановлением Президиума Российской академии архитектуры и строительных наук от 01 июля 2016 года, №7;
7. Рекомендуемая форма представления списка публикаций в научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (Web of Science), подготовленных в период с 01.08.2014 по 31.07.2016 при авторстве или соавторстве научного руководителя или исполнителей заявляемого фундаментального научного исследования (Форма 1-доп.-WoS-2016);
8. Рекомендуемая форма представления списка публикаций в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus, подготовленных в период с 01.08.2014 по 31.07.2016 при авторстве или соавторстве научного руководителя или исполнителей заявляемого фундаментального научного исследования (Форма 2-доп.-Scopus-2016);
9. Рекомендуемая форма представления списка публикаций в научных журналах, входящих в перечень, утвержденный Высшей аттестационной комиссией, подготовленных в период с 01.08.2014 по 31.07.2016 при авторстве или соавторстве научного руководителя или исполнителей заявляемого фундаментального научного исследования (Форма 3-доп.-ВАК-2016);
10. Рекомендуемая форма представления списка результатов интеллектуальной деятельности, полученных в период с 01.08.2014 по 31.07.2016 при авторстве или соавторстве научного руководителя или исполнителей заявляемого фундаментального научного исследования (Форма 4-доп.-РИД-2016);
11. Рекомендуемая форма представления списка монографий, их переводов и научных статей, имеющих международный книжный индекс ISBN, подготовленных в период с 01.08.2014 по 31.07.2016 под редакцией, при авторстве или соавторстве научного руководителя или исполнителей заявляемого фундаментального научного исследования (Форма 5-доп.-МОН-2016);
12. Перечень ВАК РФ рецензируемых научных изданий, не входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (по состоянию на 03.06.2016);
13. Информация об изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования (по состоянию на 14.06.2016);
14. Информация о научных изданиях индексируемых в системе Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science (Список журналов RSCI).



К ЮБИЛЕЮ ВЛАДИМИРА ИЛЬИЧА ТРАВУША

04 мая 2016 года исполнилось 80 лет руководителю издания Международного научного журнала “International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”, академику РААСН, профессору, доктору технических наук Владимиру Ильичу Травушу. От имени редакционного совета журнала поздравляем его с этим замечательным Юбилеем!

В.И. Травуш – Вице-президент Российской академии архитектуры и строительных наук, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, Заслуженный строитель Российской Федерации, Почетный строитель России, Почетный строитель Москвы. Действительный член МААМ, Кавалер ордена Трудового Красного Знамени, Лауреат Премии Совета Министров СССР, Дважды Лауреат Премии Правительства Российской Федерации.

В.И. Травуш – автор более 200 научных трудов и авторских свидетельств, более 70 проектов, среди которых: Останкинская телевизионная башня, большепролетные Дворцы спорта в Москве, Архангельске, Твери, Музей Хо Ши Мина в Ханое, Крытый рынок в Ржеве, Крытый конькобежный центр в Крылатском, Площадь Европы, Мост «Багратион», Башня-2000, Большая ледовая арена для хоккея с шайбой и трасса для бобслея в Сочи, административное здание в Астане, Центральное ядро и другие строящиеся сооружения ММДЦ «Москва-Сити», Башня «Миракс-плаза» в Москве, строящийся административный комплекс «Лахта-Центр».

Отмечая вклад Владимира Ильича в развитие архитектурно-строительного комплекса нашей страны и зарубежных государств, личный авторитет и профессиональные качества, не сомневаемся, что его знания, инициативность, организаторский талант и глубокое понимание проблем, стоящих перед отечественной наукой и практикой, позволят успешно решать актуальные задачи развития отрасли – фундамента общественного, социального и экономического развития России!

Желаем Владимиру Ильичу дальнейших творческих успехов, активной жизненной позиции, здоровья, счастья и удачи!

Редакционный Совет международного научного журнала
“International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”



К ЮБИЛЕЮ НИКОЛАЯ ИВАНОВИЧА КАРПЕНКО

21 мая 2016 года исполнилось 80 лет члену редакционного совета Международного научного журнала “International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”, академику РААСН, профессору, доктору технических наук Николаю Ивановичу Карпенко. От имени редакционного совета журнала поздравляем его с этим замечательным Юбилеем!

Н.И. Карпенко – академик-секретарь Отделения строительных наук РААСН, Заслуженному деятелю науки Российской Федерации, Лауреату премии Правительства Российской Федерации, Почетный строитель России, Почетный строитель Москвы.

Н.И. Карпенко – один из ведущих мировых специалистов в области теории и практики расчета железобетонных конструкций, основные направления научной деятельности которого охватывают следующие вопросы: построение общей теории деформирования и разрушения бетона и железобетона с учетом физической нелинейности, трещинообразования и анизотропии, разработка на этой основе методов определения деформаций и прочности железобетонных элементов с трещинами при сложных напряженных состояниях, в том числе при кручении, изгибе с кручением и действии поперечных сил, разработка компьютерных методов расчета плоскостных и массивных конструкций с учетом различных факторов физической нелинейности и трещинообразования, разработка норм проектирования, физико-механическая и реологическая механика высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов.

Отмечая вклад Николая Ивановича в развитие архитектурно-строительного комплекса нашей страны и зарубежных государств, личный авторитет и профессиональные качества, не сомневаемся, что его знания, инициативность, организаторский талант и глубокое понимание проблем, стоящих перед отечественной наукой и практикой, позволят успешно решать актуальные задачи развития отрасли – фундамента общественного, социального и экономического развития России!

Желаем Николаю Ивановичу дальнейших творческих успехов, активной жизненной позиции, здоровья, счастья и удачи!

Редакционный Совет международного научного журнала
“International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”



К ЮБИЛЕЮ АЛЕКСАНДРА ТЕВЬЕВИЧА БЕККЕРА

26 июня 2016 года исполнилось 70 лет члену редакционного совета Международного научного журнала “International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”, члену-корреспонденту РААСН, профессору, доктору технических наук Александру Тевьевичу Беккеру. От имени редакционного совета журнала поздравляем его с этим замечательным Юбилеем!

А.Т. Беккер – председатель Дальневосточного территориального отделения РААСН, директор Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации.

Основные направления деятельности А.Т. Беккера охватывают вопросы безопасности инженерных сооружений, морского гидротехнического строительства, морской гляциологии, ледотехники. А.Т. Беккер – руководитель проектов по освоению месторождений нефти и газа на шельфе Охотского моря, более 50 проектов в области промышленного и гидротехнического строительства на Дальнем Востоке, обладатель 33 патентов, автор более 350 научных публикаций, 9 монографий, 7 учебных пособий, руководитель научной школы в области морского гидротехнического строительства, морской гляциологии и ледотехники. Профессиональная деятельность А.Т. Беккера отмечена высокими государственными и общественными наградами.

Отмечая вклад Александра Тевьевича архитектурно-строительного комплекса нашей страны и зарубежных государств, личный авторитет и профессиональные качества, не сомневаемся, что его знания, инициативность, организаторский талант и глубокое понимание проблем, стоящих перед отечественной наукой и практикой, позволят успешно решать актуальные задачи развития отрасли – фундамента общественного, социального и экономического развития России!

Желаем Александру Тевьевичу дальнейших творческих успехов, активной жизненной позиции, здоровья, счастья и удачи!

Редакционный Совет международного научного журнала
“International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”



К ЮБИЛЕЮ ВЛАДИМИРА ИГОРЕВИЧА АНДРЕЕВА

01 июля 2016 года исполнилось 75 лет члену редакционного совета Международного научного журнала “International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”, академику РААСН, профессору, доктору технических наук Владимиру Игоревичу Андрееву. От имени редакционного совета журнала поздравляем его с этим замечательным Юбилеем!

В.И. Андреев – председатель Научного совета РААСН по сейсмологии и сейсмостойкому строительству, заведующий кафедрой сопротивления материалов Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, известный в России и за рубежом специалист в области механики неоднородных тел, механики полимеров и композитов, расчетов элементов конструкций при наличии температурного поля, радиационного облучения, автор сотен научных и учебно-методических работ, в том числе нескольких учебников, учебных пособий и монографий, получивших исключительно высокую оценку среди профессионального сообщества.

За свою многолетнюю плодотворную научную и педагогическую деятельность В.И. Андреев награжден медалью РААСН, медалями Федерации космонавтики России им. С.П. Королева, им. М.В. Келдыша, им. К.Э. Циолковского, знаком почета Киевского национального архитектурно-строительного университета, медалью МГСУ «За заслуги в области строительного образования и науки» первой степени (золотой).

Отмечая вклад Владимира Игоревича в развитие архитектурно-строительного комплекса нашей страны и зарубежных государств, личный авторитет и профессиональные качества, не сомневаемся, что его знания, инициативность, организаторский талант и глубокое понимание проблем, стоящих перед отечественной наукой и практикой, позволят успешно решать актуальные задачи развития отрасли – фундамента общественного, социального и экономического развития России!

Желаем Владимиру Игоревичу дальнейших творческих успехов, активной жизненной позиции, здоровья, счастья и удачи!

Редакционный Совет международного научного журнала
“International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”



К ЮБИЛЕЮ ТАЙМУРАЗА БАТРАЗОВИЧА КАЙТУКОВА

06 июля 2016 года исполнилось 40 лет техническому редактору Международного научного журнала “International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”, советнику РААСН, доценту, кандидату технических наук Таймуразу Батразовичу Кайтукову. От имени редакционного совета журнала поздравляем его с этим замечательным Юбилеем!

Т.Б. Кайтуков – заместитель главного ученого секретаря РААСН – член президиума РААСН, ответственный секретарь Научного Совета РААСН «Программные средства в строительстве и архитектуре», заместитель директора Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), доцент кафедры прикладной математики НИУ МГСУ.

Т.Б. Кайтуков – высококвалифицированный специалист в области разработки, исследования и развития численных и численно-аналитических методов решения строительных задач с применением вычислительной техники, автором более ста научных и учебно-методических работ (в том числе нескольких учебников и учебных пособий, получивших исключительно высокую оценку среди профессионального сообщества), член редакционной коллегии научного журнала «ACADEMIA. Архитектура и строительство».

Отмечая вклад Таймураза Батразовича в развитие архитектурно-строительного комплекса нашей страны и зарубежных государств, личный авторитет и профессиональные качества, не сомневаемся, что его знания, инициативность, организаторский талант и глубокое понимание проблем, стоящих перед отечественной наукой и практикой, позволят успешно решать актуальные задачи развития отрасли – фундамента общественного, социального и экономического развития России!

Желаем Таймуразу Батразовичу дальнейших творческих успехов, активной жизненной позиции, здоровья, счастья и удачи!

Редакционный Совет международного научного журнала
“International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”



К ЮБИЛЕЮ АЛЕКСАНДРА ВИКТОРОВИЧА КУЗЬМИНА

12 июля 2016 года исполнилось 65 лет президенту Российской академии архитектуры и строительных наук, академику РААСН, профессору Александру Викторовичу Кузьмину. От имени редакционного совета Международного научного журнала "International Journal for Computational Civil and Structural Engineering" поздравляем его с этим замечательным Юбилеем!

А.В. Кузьмин – выдающийся советский и российский архитектор, главный архитектор города Москвы (1996 – 2012), академик Российской академии художеств, Народный архитектор Российской Федерации, Заслуженный архитектор России, Почетный строитель России и Москвы, генеральный директор АО «НИЦ «Строительство». А.В. Кузьмин – руководитель и автор многих реализованных проектов, среди которых реставрация Старого Гостиного двора, восстановление Манежа, проекта планировки природно-исторического парка «Царицыно», концепция развития территории Ходынского поля, проект Ледового дворца в Крылатском.

Преданность профессии зодчего и огромный вклад А.В. Кузьмина в развитие архитектуры и строительной науки отмечены Золотой медалью им. В.Г. Шухова, медалями РААСН, золотыми медалями РАХ, четырьмя орденами Русской православной церкви, медалью Русской Православной церкви, Почетной грамотой Президента Российской Федерации, двумя премиями правительства Москвы, орденом Франции «За заслуги в области искусств и литературы», орденом Инженерного общества Бельгии «За заслуги в изобретениях» и др.

Отмечая вклад Александра Викторовича в развитие архитектурно-строительного комплекса нашей страны и зарубежных государств, личный авторитет и профессиональные качества, не сомневаемся, что его знания, инициативность, организаторский талант и глубокое понимание проблем, стоящих перед отечественной наукой и практикой, позволят успешно решать актуальные задачи развития отрасли – фундамента общественного, социального и экономического развития России!

Желаем Александру Викторовичу дальнейших творческих успехов, активной жизненной позиции, здоровья, счастья и удачи!

Редакционный Совет международного научного журнала
"International Journal for Computational Civil and Structural Engineering"



К ЮБИЛЕЮ ЕВГЕНИЯ МИХАЙЛОВИЧА ЧЕРНЫШОВА

17 июля 2016 года исполнилось 80 лет члену редакционного совета Международного научного журнала “International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”, академику РААСН, профессору, доктору технических наук Евгению Михайловичу Чернышову. От имени редакционного совета журнала поздравляем его с этим замечательным Юбилеем!

Е.М. Чернышов – первый заместитель председателя Центрального территориального отделения РААСН, известный российский ученый по проблемам создания теоретических и практических основ современного материаловедения и строительного производства, в том числе по созданию строительных композитов, научно-инженерных решений по переработке техногенных отходов, разработке изделий из ячеистых бетонов и других современных материалов, проблемам экономической эффективности развития архитектурно-строительного комплекса, автор более 400 научных работ, в числе которых монографии, авторские свидетельства и патенты на изобретения, подготовил четырех докторов и более 20 кандидатов наук.

Е.М. Чернышов – лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, дважды лауреат премии Правительства Воронежской области по науке и технике, награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени, удостоен званий – «Почетный работник высшего профессионального образования России», «Почетный дорожник России», «Почетный строитель России» и другими почетными званиями и наградами.

Отмечая вклад Евгения Михайловича в развитие архитектурно-строительного комплекса нашей страны и зарубежных государств, личный авторитет и профессиональные качества, не сомневаемся, что его знания, инициативность, организаторский талант и глубокое понимание проблем, стоящих перед отечественной наукой и практикой, позволят успешно решать актуальные задачи развития отрасли – фундамента общественного, социального и экономического развития России!

Желаем Евгению Михайловичу дальнейших творческих успехов, активной жизненной позиции, здоровья, счастья и удачи!

Редакционный Совет международного научного журнала
“International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”



К ЮБИЛЕЮ БОРИСА АЛЕКСАНДРОВИЧА КРЫЛОВА

19 августа 2016 года исполнилось 90 лет академику РААСН, профессору, доктору технических наук Борису Александровичу Крылову. От имени редакционного совета Международного научного журнала “International Journal for Computational Civil and Structural Engineering” поздравляем его с этим замечательным Юбилеем!

Б.А. Крылов – Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, Почетный строитель России, Почетный транспортный строитель, кавалер ордена «Знак Почета», Лауреату премии Совета министров СССР, академик Международной и Российской инженерных академий.

Б.А. Крылов – ведущий и широко эрудированный учёный, высококлассный специалист в области технологии бетона, интенсификации твердения бетона; строительства в экстремальных условиях: при низких температурах наружного воздуха, в вечной мерзлоте, в сухом жарком климате; применения солнечной энергии для термообработки сборных железобетонных изделий; оборудования и технологии очистки бетона, камня, металла от любых загрязнений. В результате выполненных им и под его руководством научных исследований разработаны уникальные методы термообработки бетона, а также технология и оборудование для очистки металла, камня бетона от любых загрязнений, в том числе металлизация, очистка под водой днищ судов, опор мостов, цистерн, причалов, для резки бетона и металла. Автор более 300 работ, более 100 авторских свидетельств на изобретения и патентов, в том числе зарубежных.

Отмечая вклад Бориса Александровича в развитие архитектурно-строительного комплекса нашей страны и зарубежных государств, личный авторитет и профессиональные качества, не сомневаемся, что его знания, инициативность, организаторский талант и глубокое понимание проблем, стоящих перед отечественной наукой и практикой, позволят успешно решать актуальные задачи развития отрасли – фундамента общественного, социального и экономического развития России!

Желаем Борису Александровичу дальнейших творческих успехов, активной жизненной позиции, здоровья, счастья и удачи!

Редакционный Совет международного научного журнала
“International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”



УШЕЛ ИЗ ЖИЗНИ СЕМЕН МАКЕЕВИЧ СКОРОБОГАТОВ

11 августа 2016 года на 87-м году ушел из жизни Скоробогатов Семен Макеевич – член-корреспондент РААСН, заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор.

Семен Макеевич прошел большой жизненный путь и проявил себя как блестящий ученый, талантливый педагог, оставивший яркий след и в практическом строительстве, и в науке. Многие годы он занимался важнейшим вопросом в теории строительных наук – теорией разрушений конструкций, благодаря которой стало возможным предотвратить разрушение множества зданий. Его научные работы, а их более 200, внесли неоценимый вклад в научно-технический прогресс в области строительства. Семен Макеевич был для коллег хорошим другом, наставником, у которого всегда было чему поучится – прежде всего его организованности, исполнительности и высокой требовательности к себе и другим. Его труды высоко оценены не только в России, но и за рубежом. Семен Макеевич достойно представлял отечественную строительную науку на международной арене. Среди его работ монография, посвященная теории катастроф: «Катастрофы и живучесть железобетонных сооружений (классификация и элементы теории)», которая хранится в Библиотеке Конгресса США и Британской национальной библиотеке. Профессиональная деятельность С.М. Скоробогатова была отмечена медалью Международного биографического центра (Кембридж), медалью «Человек года» Американского библиографического центра.

Уход из жизни Семена Макеевича Скоробогатова – видного ученого и обаятельного человека – невосполнимая потеря для строительной науки, а также и для каждого, кто знал его лично. Благодарная память о нем навсегда сохранится в сердцах его друзей и коллег.

Редакционный Совет международного научного журнала
“International Journal for Computational Civil and Structural Engineering”