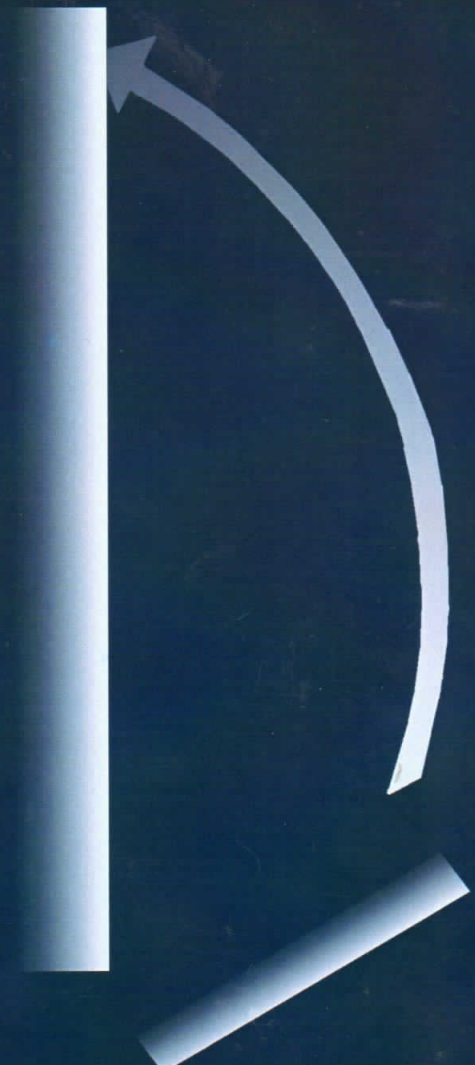


VOLUME 9, ISSUE 4, 2013

16+

**International  
Journal  
for  
Computational  
Civil and  
Structural  
Engineering**



Vladimir N. Sidorov  
Editor - in - Chief

 **begell  
house, inc.  
publishers**  
New York

  
International Association of  
Educational Civil Engineering  
Institutions, Moscow

---

*International Journal for*  
**Computational Civil and Structural Engineering**  
*Volume 9, Issue 4* *2013*

---

**EXECUTIVE EDITOR**

**Valery I. Telichenko**, Professor, Rector  
Moscow State University of Civil Engineering  
Moscow, Russia  
26, Yaroslavskoe Shosse, 129337, Moscow, Russia

**EDITOR-IN-CHIEF**

**Vladimir N. Sidorov**, Professor  
Department of Applied Mathematics  
and Computer Science  
Moscow State University of Civil Engineering  
26, Yaroslavskoe Shosse, 129337, Moscow, Russia

**TECHNICAL EDITOR**

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

**ASSOCIATE EDITORS**

**Pavel A. Akimov**, Professor, Vice-Rector  
Department of Applied Mathematics  
and Computer Science  
Moscow State University of Civil Engineering  
26, Yaroslavskoe Shosse, 129337 Moscow, Russia

**Alexander M. Belostotsky**, Professor  
Research Center STADYO  
apt. 412, 34, Ul. Verkhnyaya,  
125040, Moscow, Russia

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

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

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

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

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

**Leonid A. Rozin**, Professor  
Department of Structural Mechanics  
Technical University St. Petersburg  
29, Ul. Politechnicheskaya,  
195251 St. Petersburg, Russia

**PUBLICATION COUNCIL**

**William Begell**, President  
Begell Publishing House  
USA

**Nadezhda S. Nikitina**, Director  
ASV Publishing House  
Moscow, Russia

**Valery I. Telichenko**, Rector  
Moscow State University  
of Civil Engineering  
Moscow, Russia

## ADVISORY EDITORIAL BOARD & REVIEWERS

**Vladimir I. Andreev**, Professor  
Department of Strength of Materials,  
Moscow State Univ. of Civil  
Engineering, Yaroslavskoe shosse 26,  
129337 Moscow, Russia

**Nikolaj V. Banichuk**, Professor  
Institute for Problems in Mech.  
Russian Academy of Sciences  
101, Prosp. Vernadskogo  
117526, Russia

**Klaus-Jurgen Bathe**, Professor  
Department of Mechanical  
Engineering, Massachusetts Institute  
of Technology  
Cambridge, MA 02139, USA

**Zdenek Bittnar**, Professor  
Department of Structural Mechanics  
Czech Technical University  
7, Thakurova, 16629 Prague 6  
Czech Republic

**Alexander S. Bratus**, Professor  
Dept. of Comp. Math. and  
Cybernetics; Moscow State University  
MGU, VMK, Vorobjovy Gory  
119899 Moscow, Russia

**Evgeny G. D'yakonov**, Professor  
Dept. of Comp. Math. and  
Cybernetics; Moscow State University  
MGU, VMK, Vorobjovy Gory  
119899 Moscow, Russia

**Alexander S. Gorodetsky**  
The Inst. For Aut. Syst. in Civil Eng.  
2a, Ul. M. Krivonosa  
252180 Kiev, Ukraine

**Vladimir Karpov**, Professor  
St. Petersburg University  
d.4, Ul. 2-Krasnoarmeiskaya,  
St. Petersburg, 198005 Russia

**Galina G. Kashevarova**, Professor  
Department of Structural Mechanics  
and Computer Technology  
Perm State Technical University  
29, Komsomolsky Prospekt,  
Perm, 614990, Russia

**Hartmut Koppler**, Professor  
Bauhaus-Universitat  
31a, Windmuhlen Str.  
99425 Weimar, Germany

**Andrey V. Korgin**, Professor  
Structure Testing Department  
Moscow State Univ. of Civil  
Engineering  
26, Yaroslavskoe Shosse,  
129337 Moscow, Russia

**Vadim G. Korneev**, Professor  
Dept. of Math. and Mechanics  
St. Petersburg State University  
198904, St. Petersburg, Russia

**Sergey V. Kuznetsov**, Professor  
Institute for Problems in Mech.  
Russian Academy of Sciences  
101, Prosp. Vernadskogo,  
117526, Russia

**Pierre Ladeveze**, Professor  
Lab. de Mecanique et Technologie  
E.N.S. de Cachan /C.N.R.C./ Univ.  
Paris VI, 61 Av. du President Wilson  
94235 Cachan Cedex, France

**Ralf Lindberg**, Professor  
3, Korkechoulunkatu,  
33101, Tampere, Finland

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

**Herbert Mang**, Professor  
Inst. Fur Haustatikt und  
Festigkeitslehre  
Techische Universitaet Wien  
13, Karlsplatz,  
A-1040 Wien, Austria

**Vladimir L. Mondrus**, Professor  
Department of Structural Mechanics  
Moscow State Univ. of Civil  
Engineering  
26, Yaroslavskoe Shosse,  
129337 Moscow, Russia

**Vladimir I. Myachenkov**, Professor  
Department of Strength of Materials  
Moscow State Tech. Univ. "STANKIN"  
3a, Vadkovsky Per.,  
104472 Moscow, Russia

**L'Eugenio Onate**, Professor  
E.T.S. Ing. Caminos  
Jorge, Girano Salgado, 31-08034  
Barcelona, Spain

**Vladimir A. Palmov**, Professor  
Physical-Mechanical faculty  
Technical University St. Petersburg  
29, Ul. Polytechnicheskaya,  
195251 St. Petersburg, Russia

**Stan Pietruszczak**, Professor  
Department of Civil Engineering  
McMaster University  
Hamilton, Ontario L8S 4L7, Canada

**Chengzhi Qi**, Professor  
Beijing University of Civil  
Engineering and Architecture  
No.1, Zhanlanlu, Xicheng District,  
Beijing

**Ekkerhard Ramm**, Professor  
University of Stuttgart  
Institute for Baustatik  
7, Pfaffenwaldring, Stuttgart,  
Germany

**E. Daya Reddy**, Professor  
University of Cape Town  
Department of Applied Mathematics  
7700 Rondebosch, South Africa

**Sunil Saigal**, Professor  
National Science Foundation  
4201 Wilson Blvd.,  
Arlington, VA 22230, USA

**Vadim N. Savostyanov**, Professor,  
Department of Applied Mechanics  
and Mathematics, Moscow State  
Univ. of Civil Engineering,  
Yaroslavskoe shosse 26, 129337  
Moscow, Russia

**Bernhard A. Schrefler**, Professor  
Dipart. Di Costruzioni e Trasporti.  
Via, Marzolo, 9-35131 Padova, Italy

**Nikolaj N. Shaposhnikov**, Professor  
Department of Comp. Aided Design  
Moscow State Univ. of Railways  
MIIT, 15, Ul. Obratsova,  
101475 Moscow, Russia

**D.V. Singh**, Professor  
Vice chairman all India council for  
Technical Education, New Delhi,  
India

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

**Nils-Eric Wiberg**, Professor  
Department of Structural Mechanics  
Chalmers University of Technology  
S-41296 Goteborg, Sweden

**Zbigniew Wojcicki**, Professor  
Wroclaw University of Technology  
11 Grunwaldzki Sq., 50-377,  
Wroclaw, Poland

**Peter Wriggers**, Professor  
Technical School of Department  
1, Hochschulstrabe,  
D-6100 Darmstadt, Germany



## **INVITED REVIEWERS**

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

**Jan Buynak**, Professor, PhD, Ing.  
University of Žilina  
Univerzitná 1, 010 26, Žilina, Slovakia

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

**Sergiy Yu. Fialko**, Professor, Dr.Sc.,  
Cracow University of Technology  
Warszawska 24 St., 31-155 Kraków, Poland

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

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

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

**Markus König**, Professor, Dr.-Ing.,  
Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen, Gebäude IA, 44780, Bochum, Germany

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

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

**Jerzy Zbigniew Piotrowski**, Professor, Dr. hab., Ing.,  
Kielce University of Technology,  
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, Kielce, 25 – 314, Poland

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

## **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 researchers and practitioners in academic, governmental and industrial communities.

## **КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖУРНАЛЕ INTERNATIONAL JOURNAL FOR COMPUTATIONAL CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERING**

Журнал *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering* является международным периодическим изданием, учредителями и издателями которого выступают Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ) /Россия, г. Москва/ и Издательство Begell House Inc. /США, г. Нью-Йорк/.

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

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций.

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

# International Journal for Computational Civil and Structural Engineering

Volume 9, Issue 4

2013

## TABLE OF CONTENTS

<b>Dynamic Substructures Synthesis Methods for NPP Systems “Foundation – Structure – Equipment – Pipelines” Analysis</b> <i>Alexander M. Belostotsky, Pavel .A. Akimov, Alexey L. Potapenko, Vladislav V. Vershinin, Sergey V. Scherbina</i>	<b><u>15</u></b>
<b>Computational Simulation of External Extreme Impacts on NPP Constructions. Development and Investigations</b> <i>Alexander M. Belostotsky, Sergey I. Dubinsky, Irina N. Afanasyeva, Fedor M. Kotov, Vladislav V. Vershinin, Sergey V. Scherbina, Sergey O. Petryashev, Nicolay O. Petryashev</i>	<b><u>23</u></b>
<b>Numerical Analysis of Wind Loadings, Stress – Strain State, Strength and Stability of Concrete Structures of NPP Evaporative Cooling Towers</b> <i>Alexander M. Belostotsky, Sergey I. Dubinsky, Sergey O. Petryashev, Nicolay O. Petryashev, Irina N. Afanasyeva, Fedor M. Kotov</i>	<b><u>34</u></b>
<b>Некоторые алгоритмические особенности, связанные с использованием нерегулярных аппроксимирующих сеток при численном решении трехмерных краевых задач расчета конструкций в рамках дискретно-континуального метода конечных элементов</b> <b>Часть 1: Дискретно-континуальная постановка задачи</b> <i>П.А. Акимов, М.Л. Мозгалева, В.Н. Сидоров</i>	<b><u>44</u></b>
<b>Некоторые алгоритмические особенности, связанные с использованием нерегулярных аппроксимирующих сеток при численном решении трехмерных краевых задач расчета конструкций в рамках дискретно-континуального метода конечных элементов</b> <b>Часть 2: Алгоритм задания стандартных типов граничных условий</b> <i>П.А. Акимов, М.Л. Мозгалева, В.Н. Сидоров</i>	<b><u>64</u></b>
<b>Двухэтапный синтез структурных конструкций с использованием генетического алгоритма и тетраэдризации Делоне</b> <i>А.В. Алексейцев</i>	<b><u>83</u></b>
<b>Методы моделирования изменения напряженно-деформированного состояния конструкций во времени</b> <i>М.С. Барабаи</i>	<b><u>92</u></b>

<b>Моделирование жизненного цикла конструкций высотных зданий с учетом сопротивляемости прогрессирующему разрушению</b> <i>М.С. Барабаш</i>	<b><u>101</u></b>
<b>Идентификация действительных инерционно-жесткостных свойств конструктивных элементов адаптируемых конечноэлементных моделей зданий и сооружений. Состояние проблемы и пути решения.</b> <i>А.М. Белостоцкий, П.И. Новиков</i>	<b><u>107</u></b>
<b>Краткосрочный прогноз деформаций земной поверхности и напряженно-деформированное состояние здание в мульде сдвижения</b> <i>А.В. Воробьев, Г.Г. Кашеварова</i>	<b><u>119</u></b>
<b>Оптимальное проектирование ферм сложной конфигурации</b> <i>Т.Л. Дмитриева</i>	<b><u>128</u></b>
<b>Методика оценки аэродинамической комфортности пешеходных маршрутов в городе Москва с использованием численного моделирования</b> <i>С.И. Дубинский, А.В. Дорошенко</i>	<b><u>137</u></b>
<b>Численное моделирование поля скоростей ветра как класса случайных процессов</b> <i>С.И. Дубинский, А.Р. Усманов, И.Н. Афанасьева</i>	<b><u>143</u></b>
<b>К оценке эффективности динамического и ударного гасителей колебаний пассивного типа при действии периодических импульсов короткой продолжительности</b> <i>А.В. Дукарт</i>	<b><u>149</u></b>
<b>Исследование динамического поведения вантовых конструкций при воздействии торнадо по модели Y.K. Wen</b> <i>В.Б. Зылев, Н.А. Григорьев</i>	<b><u>158</u></b>
<b>Общая устойчивость высотного объекта на напряженно-деформируемом основании</b> <i>В.К. Иноземцев</i>	<b><u>165</u></b>
<b>Развитие решение Конуэя на задачи изгиба круглых анизотропных пластин переменной толщины на упругом основании</b> <i>Е.Б. Коренева</i>	<b><u>173</u></b>
<b>Геометрически нелинейное деформирование и устойчивость плоских упругих стержней с учетом жесткостей на растяжение – сжатие, сдвиг и изгиб</b> <i>В.В. Лалин, Д.А. Кушова</i>	<b><u>178</u></b>
<b>Методика построения кусочно-линейной модели нелинейного объекта управления</b> <i>Р.Л. Лейбов</i>	<b><u>186</u></b>

- Статический анализ эволюции температурных нагрузок на здания и геоэкологические системы в г. Москве** **199**  
*В.И. Прокопьев, М.С. Хлыстунов, Ж.Г. Могилюк*
- Вычислительная программа по расчету напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин: опыт создания, методики и алгоритмы** **208**  
*М.П. Саинов*
- Расчет надежности фундаментов машин по критериям прочности грунта основания и амплитудам колебаний при ограниченной статистической информации** **226**  
*В.С. Уткин*
- Параметры поглощения энергии бетонов, изготовленных способом нагнетания раствора при циклических нагружениях** **238**  
*С.Г. Есаян, В.В. Погосян, Д.Г. Клекчян*
- Рецензия на серию книг А.Б. Золотова, П.А. Акимова, В.Н. Сидорова, М.Л. Мозгалевой, А.Р. Туснина** **243**  
*В.В. Петров*



# МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ВО ВРЕМЕНИ

*М.С. Барабаш*

Национальный авиационный университет, г. Киев, УКРАИНА

**АННОТАЦИЯ:** В статье рассматривается влияние реологических свойств бетона на усилия, возникающие в несущих конструктивных элементах строительного объекта. Цель теоретических исследований состоит в установлении влияния процесса ползучести бетона на напряженно-деформированное состояние несущих конструкций.

**Ключевые слова:** моделирование, жизненный цикл, ползучесть бетона, несущие конструкции, информационная технология

## THE SIMULATION METHODS OF STRESS-DEFORMED STATE OF STRUCTURES IN TIME

*Maria S. Barabash*

National Aviation University, Kiev, UKRAINE

**ABSTRACT:** In given article is considered the influence the rheological properties of the concrete forces occurring in the bearing structural elements of building object. The aim of theoretical research was concluded in determination of influence creep of concrete on bearing systems' stress-strain state.

**Key words:** modeling, life cycle, creep of concrete, information technology

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Надежность и долговечность бетонных и железобетонных конструкций и сооружений не может быть обеспечена без учета важных особенностей деформирования бетона. Реологические свойства бетона, обусловленные, в основном, его свойством ползучести, оказывают большое влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции во времени. Так, с течением времени происходит перераспределение усилий между сильно и слабо нагруженными элементами, между арматурой и бетоном. Нарастание перемещений во времени также оказывает существенное влияние на НДС конструкции, изменяющееся с течением времени.

Особенно это сказывается для таких конструкций, как пологие железобетонные оболочки, для которых уменьшение стрелы подъема может сказаться на увеличении усилий в несколько раз и привести к аварии. Прогнозирование длительного деформирования бетона во времени является актуальным, т.к. от правильного учета этих особенностей бетона и железобетона при проектировании зависит надежность и долговечность сооружений, а также соответствие сооружения предъявляемым к нему требованиям.

Необходимо отметить, что проектируемое сооружение кроме надежности, безопасности и экономической целесообразности должно обеспечить функциональную пригодность. Определение функциональной пригодности

сооружений невозможно без правильного прогнозирования перераспределения напряжений между бетоном и арматурой происходящего вследствие ползучести бетона.

Ползучесть бетона может быть определена как увеличение деформации при постоянной нагрузке. Деформации ползучести могут в несколько раз превосходить деформации от кратковременной нагрузки, поэтому изучение и учет ползучести имеет большое значение в строительстве.

Несущая способность эксплуатируемой конструкции может быть точно установлена лишь при ее разрушении, что неприемлемо с практической точки зрения, а неразрушающие методы контроля дают лишь косвенную информацию о состоянии объекта. Поэтому важным моментом становится проведение численного эксперимента по определению действительного напряженно-деформированного состояния.

### 3. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Методы расчёта, основанные на классических аналитических методах, не всегда позволяют полностью обеспечить выполнение данных требований. В связи с этим создаются методы расчёта максимально приближенные к реальным условиям. Поэтому большое значение приобретает выбор математических моделей адекватно описывающих работу конструкции при учете изменяющихся со временем жесткостных характеристик.

Значение длительной прочности бетона получают экстраполяцией опытных данных:

$$\eta_u = \sigma_u / R_b - 0,04 \lg t, \quad (1)$$

где  $\eta_u$  - длительная прочность бетона

$\sigma_u$  - напряжение

$R_b$  - нормативное сопротивление бетона.

$t$  - время выдержки старого бетона под действием длительной нагрузки;

Длительное ступенчатое нагружение приводит к повышению длительной прочности. Причиной этого является приспособляемость материала и снижение концентрации (релаксация) напряжений за счет ползучести, создаются условия для более синхронного разрушения отдельных объемов материала, вследствие этого рекомендуется постепенное нагружение конструкции в течение нескольких месяцев.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Действующие нормы проектирования практически не учитывают фактор времени и срок службы в расчетах несущих конструкций. Однако, с течением времени железобетонные конструкции изменяют свои жесткостные характеристики, в частности снижаются прочность и модуль упругости бетона.

Напряжения в арматуре и бетоне следует определять по расчетным диаграммам состояния материалов исходя из суммарных относительных деформаций от всех воздействий, включая начальные и развивающиеся в процессе эксплуатации конструкции (усадка, ползучесть, набухание, предварительное напряжение, самоупрочнение и т. п.).

Развивающийся во времени процесс разрушения связывают с явлением ползучести, вследствие чего происходит накопление повреждений. Кривую длительной прочности строят в координатах напряжение-время до разрушения для данного напряжения. В двойных логарифмических координатах часто получают два отрезка прямых. Первый участок соответствует вязкому разрушению при высоких уровнях нагрузок, второй участок соответствует хрупкому разрушению в результате накопления микротрещин в межзеренных образованиях.

Программный комплекс ЛИРА-САПР предоставляет возможность проведения численных экспериментов такого рода. В этом комплексе учет ползучести реализован на основе модифицированной теории старения [4,5] согласно которой касательный (тангенциальный) модуль упругости зависит от начального модуля упругости  $E_{cm}$ , относительной влажности среды RH, времени эксплуатации  $t$  и напряжения в бетоне  $\sigma$ :

$$E_c = f(E_{cm}, RH, t, \sigma). \quad (2)$$

Эту зависимость можно выразить с помощью коэффициента ползучести  $\varphi(t, t_0)$ :

$$E_c = \frac{E_{cm}}{\varphi(t, t_0)} \quad (3)$$

Ползучесть и усадка бетона зависят, в основном, от относительной влажности окружающей среды. На ползучесть и усадку бетона также оказывает влияние геометрические размеры конструктивного элемента и состав бетона, степень зрелости бетона (начальная прочность) при первоначальном приложении нагрузки, а также продолжительность нагружения и величина нагрузки.

Коэффициент ползучести  $\varphi(t, t_0)$  связан с касательным (тангенциальным) модулем упругости  $E_c$ , который может быть принят равным  $1,05E_{cm}$ . ( $E_c = 1.05 E_{cm}$ ), где  $E_{cm}$  - модуль деформации.

Если особая точность не требуется, то в качестве предельной характеристики ползучести  $\varphi(\infty, t_0)$  может быть принято значение от 0.95, при условии, что бетон в момент времени, соответствующий приложению нагрузки,  $t = t_0$ , не подвергается сжимающим напряжениям, большим, чем  $0,45f_{ck}(t_0)$ .

Где  $f_{ck}$  — характеристическая цилиндрическая прочность бетона на сжатие в возрасте 28 сут.

Зависимость коэффициента ползучести от времени может быть выражена формулой:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0), \quad (4)$$

где  $\varphi_0$  — условный начальный коэффициент ползучести бетона,  $\beta_c(t, t_0)$  — коэффициент учета ползучести во времени.

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0). \quad (5)$$

Если расчетное сопротивление бетона сжатию  $f_{cm} > 35$  МПа, то для дальнейшего расчета необходимо ввести поправочные коэффициенты, которые в остальных случаях равны 1:

$$\alpha_1 = [35/f_{cm}]^{0.7}; \quad (6)$$

$$\alpha_2 = [35/f_{cm}]^{0.2}; \quad (7)$$

$$\alpha_3 = [35/f_{cm}]^{0.5}. \quad (8)$$

Фактор влияния относительной влажности RH на коэффициент ползучести:

$$\varphi_{RH} = \left[ 1 + \frac{1 - RH}{0.1 \sqrt{h_0}} \alpha_1 \right] \alpha_2, \quad (9)$$

где  $h_0$  - условный размер элемента, в мм:

$$h_0 = \frac{2A_c}{u}, \quad (10)$$

где  $A_c$  — площадь бетонного сечения,  $u$  — часть периметра сечения, которая подвержена атмосферному воздействию.

Фактор, учитывающий прочность бетона:

$$\beta(f_{cm}) = \frac{10.8}{\sqrt{f_{cm}}}, \quad (11)$$

Фактор, разрешающий влияние условного возраста бетона на коэффициент ползучести:

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + t_0^{0.2}}, \quad (12)$$

где  $t_0$  — условный возраст бетона:

$$t_0 = \sum_{i=1}^n e^{\left(\frac{-0.0001}{2.5T + T(\Delta t_i)} - 13.68\right)} \Delta t_i, \quad (13)$$

где  $T(\Delta t_i)$  – превалирующая температура периода,  $\Delta t_i$  – количество дней с этой температурой.

Коэффициент учета развития ползучести во времени:

$$\beta_c(t, t_0) = [(t - t_0) / (\beta_H + t + t_0)]^{0.3}, \quad (14)$$

где  $\beta_H$  – коэффициент влияния влажности и условного размера элемента:

$$\beta_H = 1.5 [1 + (0.012RH)^{1.6}] h_0 + 250\alpha_3 \leq 1500\alpha_3, \quad (15)$$

Если напряжения сжатия бетона в возрасте  $t_0$  превышает значение  $0,45f_{ck}(t_0)$ , то, как правило, следует учитывать нелинейную ползучесть. Такой высокий уровень напряжений может появиться в результате предварительного напряжения, например, в сборных преднапряженных элементах на уровне напрягаемой арматуры. В этих случаях нелинейный условный коэффициент ползучести определяется по формуле

$$\varphi_{nl}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot e^{(1.5(k_\sigma - 0.45))}, \quad (16)$$

При этом  $\varphi_{nl}(\infty, t_0)$  – нелинейный условный коэффициент ползучести, вводимый взамен  $\varphi(\infty, t_0)$ ;

$k_\sigma$  – отношение «напряжение – прочность»  $\sigma_c / f_{ck}(t_0)$ ,

где  $\sigma_c$  – напряжение сжатия, а  $f_{ck}(t_0)$  – характеристическая прочность бетона в момент времени, соответствующий нагружению.

Деформация ползучести бетона  $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$  в возрасте  $t = \infty$ , при постоянном напряжении сжатия  $\sigma_c$ , приложенном во время  $t = t_0$ , рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_{c0}}, \quad (17)$$

Где  $E_{c0}$  – модуль упругости для нормального бетона при напряжении  $\sigma_c = 0$  в возрасте 0 сут;

Описанная методика реализована в программном комплексе ЛИРА-САПР.

Технология расчета конструкций с учетом ползучести бетона выглядит следующим образом:

- выполняется расчет в линейной постановке на все виды нагружений (статические, силовые, статические деформационные, динамические);
- определяются расчетные сочетания усилий или расчетные сочетания нагружений;
- выполняется подбор арматуры в сечениях стержневых или пластинчатых элементов;
- производится унификация армирования элементов;
- по результатам армирования формируются новые жесткостные характеристики конструктивных элементов для последующего нелинейного расчета;
- задаются параметры ползучести бетона, учитывающие влажность и усадку бетона;
- назначается нагружение, на которое будет производиться расчет с учетом ползучести бетона;
- выполняется расчет для заданных промежутков времени. На каждом этапе расчета для каждого элемента определяется новая жесткость, которая зависит от напряжения бетона в этом элементе и заданных параметров ползучести. Новые переменные жесткости получаются в точках интегрирования как по сечению, так и по конечному элементу, в соответствии с заданной диаграммой деформирования. На каждом этапе определяются усилия, перемещения и новые жесткости по касательному модулю деформации для заданного промежутка времени.

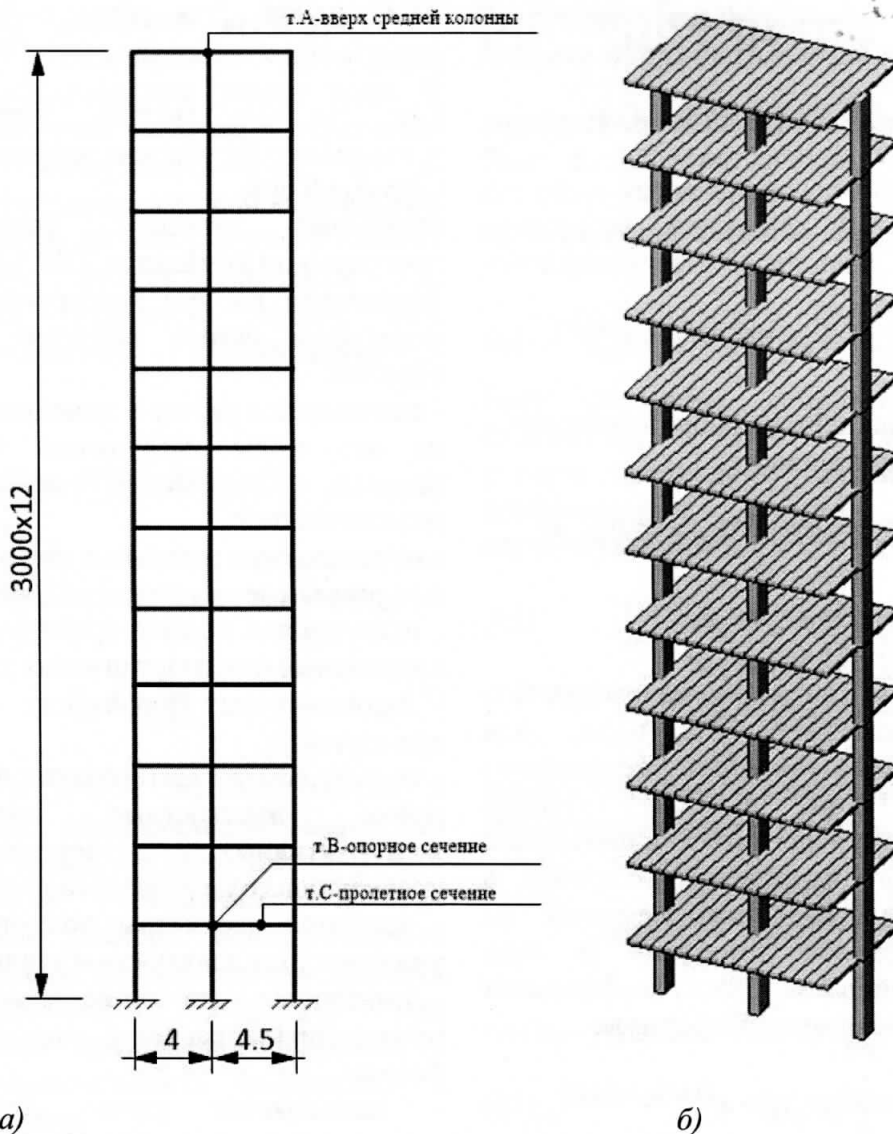


Рисунок 1. Расчетная схема (а) и компьютерная модель (б) многоэтажной рамы.

### ПРИМЕР 1. ДВУХПРОЛЕТНАЯ МНОГОЭТАЖНАЯ РАМА

Приведем примеры численного эксперимента по моделированию изменения напряженно-деформированного состояния во времени для многоэтажной рамы и полой железобетонной оболочки.

На рисунке 1 приведена расчетная схема и компьютерная модель железобетонной многоэтажной двухпролетной рамы.

Условно раму можно рассматривать как

фрагмент пространственного железобетонного монолитного каркаса здания. Ригели представляют собой вырезанные полосы перекрытий шириной 6 м и толщиной 0,2 м. Колонны имеют прямоугольное сечение - 40x60см. Длительная нагрузка на ригель составляет 180кН/п.м. Бетон марки В40, относительная влажность составляет 80%.

В таблице 1 представлены усилия и перемещения элементов многоэтажной рамы при упругом и физически нелинейном расчетах с учетом ползучести. Анализ результата, при-



веденного в таблице 1, свидетельствует о некотором перераспределении усилий и значительном увеличении деформаций при учете ползучести, по сравнению с упругим расчетом. Так нормальная сила в средней наиболее нагруженной колонне -1024,83 кН с течением времени уменьшается до -970,44 кН, перераспределяясь на менее на-

груженные крайние колонны. Опорный момент в ригеле (сечение В) -24,84 кН также уменьшается до -20.76 кН, перераспределяясь на пролетное сечение С. В ряде случаев значительное увеличение перемещений, может оказаться решающим фактором в обеспечении живучести конструкций.

Таблица 1

	Упругий расчет	Нелинейный расчет с ползучестью			
		28 суток	365суток	1100 суток	1500 суток
Нормальная сила N в средней колонне I этажа	-679,43	-1024,83	-988,96	-973,65	-970,44
Нормальная сила N в крайней колонне I этажа	-458,66	-669,55	-686,87	-694,27	-695,82
Момент M в ригеле (опорное сечение,В), кН	-24,57	-24,84	-26,17	-29,28	-20.76
Момент M в ригеле (пролетное сечение,С), кН	21	22,92	24,03	24,50	24,59
Перемещение верха средней колонны (z),мм	-19,69	-51,94	-63,21	-67,99	-68,99

## ПРИМЕР 2. ПОЛОГАЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННАЯ АРКА

На рисунке 2 представлена расчетная схема и компьютерная модель пологой арки. Пролет арки составляет 20 м, стрела подъема принимается 0.5 м, поперечное сечение 600x20 см. Арка нагружена, кроме собственного веса, равномерно распределенной нагрузкой  $q=8\text{т/м}$ . Бетон принимается марки В40, относительная влажность 50%. В таблице 2 приведены результаты расчетов в упругой постановке и в нелинейной постановке с учетом ползучести бетона при армировании нижнего слоя  $F_a=50\text{см}^2$  и верхнего слоя  $F_a=30\text{см}^2$ . При моделировании пологой арки необходимо одновременно учитывать и физическую, и геометрическую нелинейность, в связи с тем, что одновременно необходимо учесть совместную работу бетона и арматуры и изменение формы арки при действии постоянно действующей равномерно-

распределенной нагрузки.

Приведенный пример показывает насколько важно моделировать работу конструкций в эксплуатационный период.

Учет ползучести может обнаружить значительный рост перемещений и усилий.

Приведенные в таблице 2. результаты показывают, что перемещения через 5 лет эксплуатации более чем в 5 раз превысили перемещения, полученные на основании упругого расчета.

Нормальные усилия в оболочке в связи с тем, что она стала более пологой, увеличились в 1.2 раза, а изгибающий момент в середине пролета в 6.5 раз.

Для пологих железобетонных оболочек увеличение перемещений уменьшает пологость оболочки, что может привести к значительному росту усилий. В этом смысле моделирование работы конструкций во времени и учет ползучести может выявить важные факторы, влияющие на живучесть конструкций.

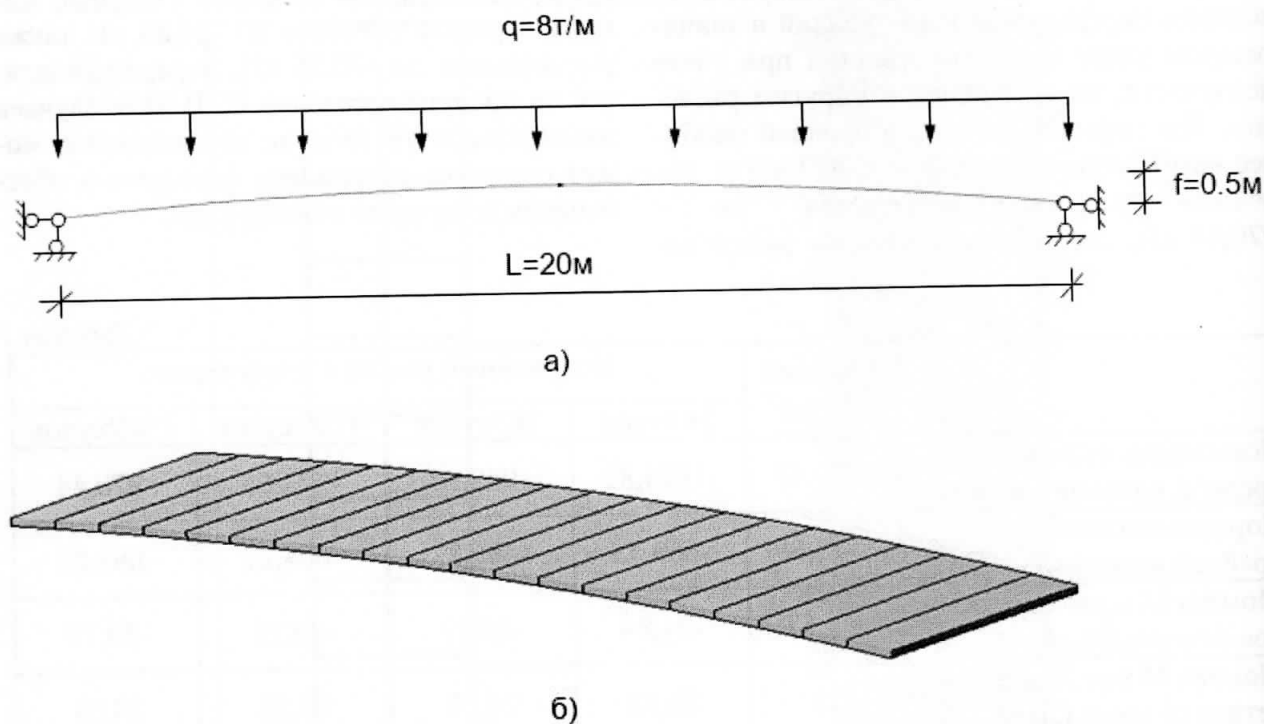


Рисунок 2. Расчетная схема (а) и компьютерная модель (б) пологой арки

Таблица 2

Параметры напряженно-деформированного состояния	Упругий расчет	Нелинейный расчет с учетом ползучести				
		0 суток	28 суток	365 суток	1100 суток	1500 суток
Максимальные перемещения по оси $x$ , мм	$\pm 0,99$	$\pm 1,67$	$\pm 1,65$	$\pm 1,65$	$\pm 1,65$	$\pm 1,65$
Максимальные перемещения по оси $z$ в середине пролета, мм	-43,5	-193	-205	-222	-230	-232
$N_{max}$ , т	-1111,4	-1281,9	-1298,99	-1323,16	-1335,57	-1338,3
$M_{max}$ , т*м	14	68	75,5	85,8	91	92,1

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ

Для современных сложных сооружений (мосты, большепролетные покрытия, высотные здания и др.), как правило, конструктивная схема обуславливается не только упругим расчетом, но и процессом изменения напряженно-деформированного состояния во времени. В процессе эксплуатации конструк-

тивная схема сооружения может многократно изменяться, усилия и перемещения перераспределяться, значительно повышая вероятность трещинообразования.

Для изучения физической системы методами математического моделирования ее заменяют абстрактной системой - математической моделью.

Реализация математической модели на компьютере дает возможность многократно и в широком диапазоне изменять входные параметры и условия функционирования сложных систем, заменяя, таким образом, экспериментальные исследования численным экспериментом. Кроме того, при решении ряда сложных конструкторских задач возможно и необходимо применение вариантного проектирования.

На современном этапе развития компьютерной техники разработано множество программных комплексов (ЛИРА-САПР, MOHOMAX-САПР, SCAD, STARK, COSMOS, ANSYS, NASTRAN и др.), реализующих метод конечных элементов и позволяющих производить расчеты сложных систем.

Программный комплекс ЛИРА-САПР предназначен для расчета и проектирования строительных конструкций различного назначения, производит расчеты геометрически и физически нелинейных сложных систем. Учет особенностей изменения напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций высотных зданий во времени реализован в программном комплексе ЛИРА-САПР.. Моделирование процесса старения бетона, по сути, является нелинейной задачей, обусловленной учетом свойств материала (физическая нелинейность). Решение этой задачи в ПК ЛИРА САПР основана на основных методах теории прочности бетона, которые в физическом смысле представляют собой реализацию законов нелинейного деформирования материалов по различным теориям.

## ВЫВОДЫ

Моделирование учета реологических свойств материала имеет большое значение для конструкций строительных объектов из монолитного железобетона, так как в этом случае необходимо учитывать такие эффекты:

- при длительном действии нагрузки происходит перераспределение усилий между сильно нагруженными элементами (усилия в них уменьшаются) и менее нагруженными (усилия в них увеличиваются);
  - ползучесть бетона обуславливает рост перемещений, что, помимо увеличения деформативности, может вызвать увеличение усилий (случай пологой оболочки)
  - в железобетонном элементе при длительном действии нагрузки в результате ползучести бетона происходит перераспределение усилий между бетоном и арматурой;
  - в центрально-сжатых железобетонных колоннах усадка и ползучесть действуют в одном направлении, уменьшая напряжения в бетоне и увеличивая их в продольной арматуре, так как бетон, деформируясь, разгружается. Однако при увеличении нагрузки на колонну деформации арматуры возрастают, в то время как в бетоне предельные деформации ограничиваются сравнительно небольшими значениями. Это приводит к обратному перераспределению усилий – нагружению бетона и нагрузке арматуры. Ползучесть бетона, вызывая увеличение напряжений в арматуре колонн при эксплуатационной нагрузке, не уменьшает конечной несущей способности элемента.
  - неравномерная осадка вертикальных элементов (колонны и пилоны имеют большие деформации, чем стены и диафрагмы);
  - конструкции, как правило, включаются в работу до набора бетоном расчетной прочности (как правило, распалубка производится значительно раньше, чем бетон наберет расчетную 28-дневную прочность);
- и многие другие эффекты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Городецкий А.С., Евзеров И.Д.** Компьютерные модели конструкций. – М: Изд-во АСВ, 2009. – 360 с.
2. **Верюжский Ю.В., Колчунов В.И., Барабаш М.С., Гензерский Ю.В.** Компьютерные технологии проектирования железобетонных конструкций. – Учебное пособие. – К.: Книжное издательство НАУ, 2006. – 808 с.
3. **Яценко Е.А.** Влияние длительных нагрузок и ползучести бетона на предельные состояния железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. - 1990. - № 8. -С.21-22.
4. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (p.30)
5. Eurocode 2: Design of concrete structures. Annex B (p.202)

---

Барабаш Мария Сергеевна, Национальный авиационный университет, кафедра компьютерных технологий строительства, докторант, 03058, Украина, г. Киев, проспект Космонавта Комарова, дом 1  
e-mail: bmari@ukr.net, bmari@liraland.com.ua

Maria S. Barabash, Department of Computer Technology Construction, National Aviation University, 1, Kosmonavta Komarova, 03058, Kiev, UKRAINE  
e-mail: bmari@ukr.net, bmari@liraland.com.ua

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ПРОГРЕССИРУЮЩЕМУ РАЗРУШЕНИЮ

*М.С. Барабаш*

Национальный авиационный университет, г. Киев, УКРАИНА

**АННОТАЦИЯ:** В статье рассматриваются вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации высотных зданий и сохранения проектных показателей при возникновении аварийных ситуаций и локальных обрушений строительного объекта. Цель теоретических исследований состоит в разработке методики проектирования высотных зданий с учетом конструктивных мероприятий, обеспечивающих устойчивость здания к «прогрессирующему» разрушению.

**Ключевые слова:** моделирование, жизненный цикл, прогрессирующее обрушение, несущие конструкции, информационная технология, оценка устойчивости

## MODELING THE LIFE CYCLE HIGH-RISE BUILDINGS STRUCTURES IN VIEW RESISTANCE PROGRESSIVE DESTRUCTION

*Maria S. Barabash*

National Aviation University, Kiev, UKRAINE

**ABSTRACT:** The article is considered the safe operation of high-rise buildings and conservation design parameters in case emergency situation and local collapses. The goal of theoretical research is to develop a methodology of designing high-rise buildings to meet design measures to ensure the sustainability of the building to the "progressive" collapse.

**Keywords:** modeling, life cycle, progressive collapse, structural engineering, information technology, sustainability assessment

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе в строительном проектировании происходит переход от основополагающего критерия несущей способности конструкций к критерию безопасности строительных объектов для людей и окружающей среды на протяжении всего жизненного цикла строительного объекта. Обеспечение безаварийной эксплуатации существующих зданий и сооружений предполагает умение прогнозировать их поведение при изменении условий эксплуатации и в аварийных ситуациях при частичной потере несущей способности, а для этого требу-

ются высокопроизводительные программные комплексы.

Каждое здание, сооружение или отдельная конструкция имеет определенное назначение, эксплуатируется в определенных условиях и обязательно должно удовлетворять требованиям безопасности. Требования безопасности включают в себя требования предотвращения аварий и обрушений строительного объекта в целом или составляющих его частей, которые могут представлять опасность для здоровья и жизни людей, либо нанести ущерб окружающей среде или послужить причиной других аварийных ситуаций.



## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При эксплуатации высотных зданий, как объектов с повышенными требованиями к безопасности, надежности и социальной значимости, должны быть четко представлены три стратегии:

- мониторинг технического состояния конструктивных элементов, инженерных систем, помещений и прилегающей территории;
- комплекс мероприятий по предупреждению преждевременного износа и оперативного управления параметрами среды обитания;
- стратегии, предусматривающие устранение (ликвидацию) физического и морального износа.

Высотные здания, проектируемые в современных условиях, имеют ряд принципиальных отличий, от зданий, которые проектировались десять лет назад. Таким образом, не накоплено достаточно опыта эксплуатации таких зданий. Это касается большей высоты проектируемых зданий, а также принципиально новых конструктивных решений и инженерных систем. По нагрузкам и воздействиям, учитываемым при проектировании, новые высотные здания можно рассматривать как аналоги существующих. Однако, реакция проектируемых зданий на случайные агрессивные воздействия со стороны окружающей среды, пользователей и др. в настоящее время изучена недостаточно и, следовательно, труднопредсказуема.

Важнейшим условием обеспечения безопасности при эксплуатации высотных зданий и сохранения проектных показателей качества среды обитания в них является научно обоснованное использование стратегии назначения условий (или моментов времени) проведения плановых капитальных ремонтов, обеспечивающих полное восстановление первоначальных свойств конструкций и инженерного оборудования. Поэтому на стадии проектирования высотного здания, выполнив системный анализ проектных реше-

ний, используемых материалов, оборудования и технологий и, опираясь на существующий математический аппарат необходимо рассчитывать перспективные планы ремонтов, которые являются основой проекта технической эксплуатации высотных зданий.

Немаловажным условием для надежной и безопасной работы является проведение мониторинга зданий и сооружений в процессе их строительства и эксплуатации. Общей целью мониторинга объектов является проведение долговременного контроля нагрузок, усилий, перемещений, деформаций конструкций, напряжений в контрольных сечениях для установления соответствия фактического напряженно-деформированного состояния конструкций расчетным данным и рабочему проекту. Кроме того, в результате мониторинга могут быть обнаружены критические и предаварийные состояния наблюдаемых сооружений. При проведении мониторинга решаются следующие основные задачи:

- выбор объектов контроля, определение в них основных сечений и назначение контрольных точек на объектах наблюдения;
- разработка методов определения контролируемых параметров, выбор серийных или разработка индивидуальных технических средств контроля, изготовление и установка их на объекте;
- проведение визуальных, инструментальных наблюдений и определение фактических перемещений, деформаций, напряжений, усилий в контролируемых конструктивных элементах;
- оценка технического состояния конструкций по данным натурных наблюдений и результатам расчетов.

## 3. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Для оценки устойчивости здания против прогрессирующего обрушения необходимо

рассматривать лишь наиболее опасные расчетные схемы разрушения [2].

Расчет пространственной модели здания рекомендуется проводить с учетом физической и геометрической нелинейности. Рекомендуется использовать пространственную расчетную модель. В модели могут учитываться элементы, которые при нормальных эксплуатационных условиях являются несущими (например, навесные наружные стеновые панели, железобетонные ограждения балконов и т.п.), а при наличии локальных воздействий активно участвуют в перераспределении усилий в элементах конструктивной системы. Расчетная модель здания должна учитывать возможность удаления (разрушения) отдельных вертикальных конструктивных элементов. Расчетная модель здания должна быть рассчитана отдельно с учетом каждого (одного) из локальных разрушений.

Расчет здания рекомендуется выполнять с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР имеющего возможность учета физической и геометрической нелинейности, что обеспечивает наибольшую достоверность результатов расчета и снижение дополнительных материалозатрат [3,4].

Рекомендуется проводить расчет по следующей схеме:

- производится расчет всей схемы в физически нелинейной постановке на постоянные и временные нагрузки, входящие в особое сочетание;
- полученное напряженно деформируемое состояние является стартовым для расчета на нагрузку от удаляемых элементов;
- расчет на дополнительную нагрузку от удаляемых элементов производится в физически и геометрически нелинейной постановке. Нагрузка от удаляемых элементов соответствует усилиям в них, полученным на первом этапе расчета и увеличенным на коэффициент динамичности 1.1. Проверка на прочность оставшихся элементов выполняется без учета продольного изгиба.

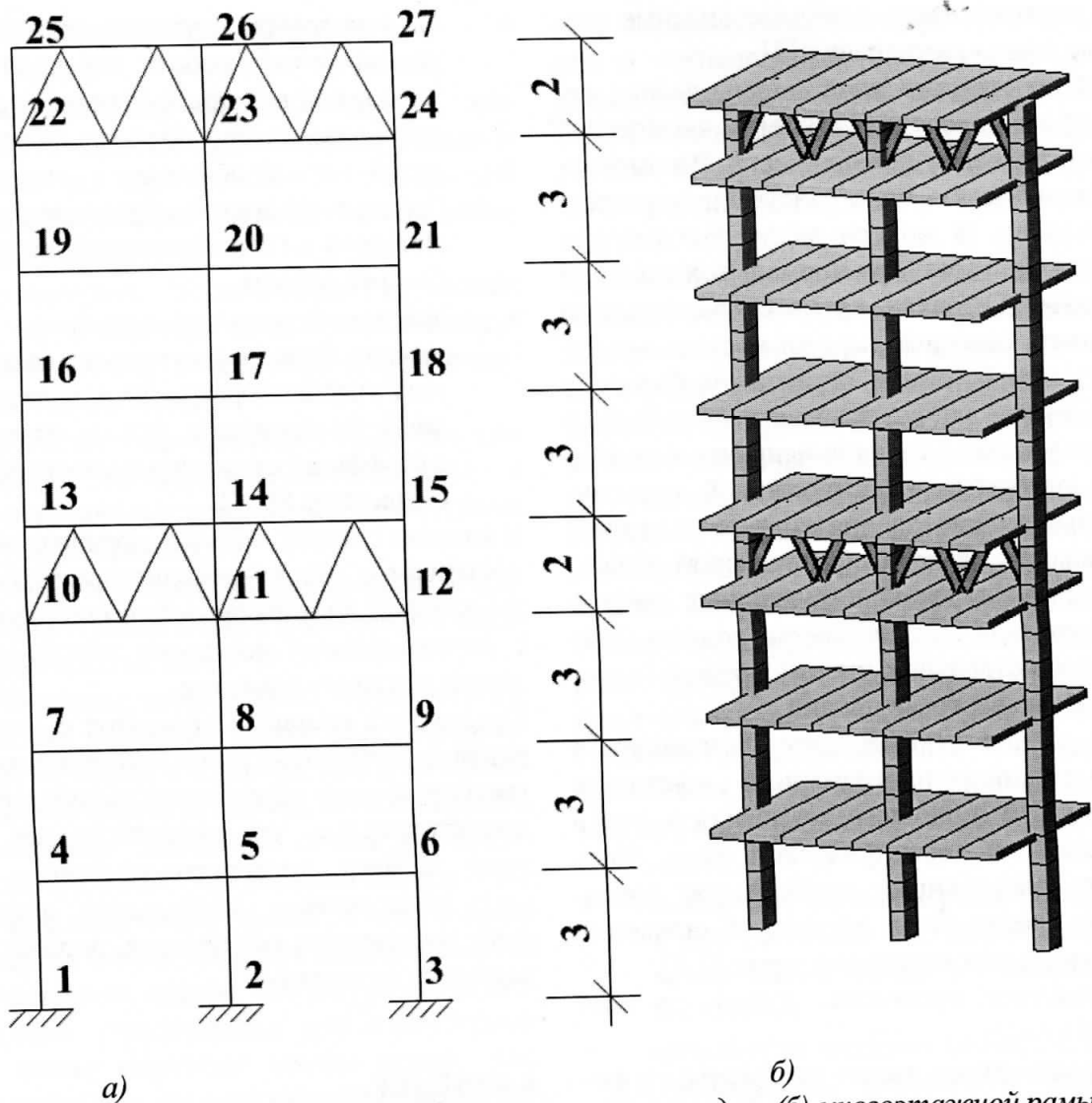
- В некоторых случаях целесообразно рассматривать работу перекрытий над удаленной колонной (пилоном, стеной) при больших прогибах как висячей железобетонной оболочки с учетом мембранных эффектов обусловленных физической и геометрической нелинейностью ее работы.
- Каждое перекрытие высотного здания должно быть рассчитано на восприятие веса участка перекрытия вышележащего этажа (постоянная и длительная нагрузки с коэффициентом динамичности  $k_f = 1,5$ ) на площади 80 м<sup>2</sup>.

В зданиях следует отдавать предпочтение монолитным и сборно-монолитным перекрытиям, которые должны быть надежно соединены с вертикальными несущими конструкциями здания стальными связями.

Соединения сборных элементов с монолитными конструкциями, препятствующие прогрессирующему обрушению зданий, должны проектироваться не равнопрочными. При этом, элемент, предельное состояние которого обеспечивает наибольшие пластические деформации соединения, должен быть наименее прочным.

#### 4. ПРИМЕР

На рис.1 представлена многопролетная восьмизэтажная рама, четвертый и восьмой этаж рамы — технический, усиленный металлической фермой. Условно раму можно рассматривать как фрагмент пространственного каркаса здания. Ригели представляют собой вырезанные полосы перекрытий шириной 6м и толщиной 0.2м, раскосы фермы выполнены из металлического прокатного профиля 30Б1. Сечение колонн 0.4х0.6м. Кроме собственного веса, на ригель приложена равномерно распределенная вертикальная нагрузка  $q=20$ т. Закрепление колонн в фундамент обеспечивается закреплением от горизонтальных и вертикальных перемещений, а также углов поворота.



*Рисунок 1. Расчетная схема (а) и компьютерная модель (б) многоэтажной рамы.*

На рисунке 2 показаны эпюры продольных сил  $N$  в проектном состоянии рамы (1) и в запроектном состоянии с учетом аварийного выхода из строя крайней колонны, расположенной между узлами 18-21. Аварийный выход из строя крайней колонны моделировался в две стадии: на первой стадии рассчитывалась вся рама; на второй стадии расчет выполнялся без крайней колонны 18-21. Напряженно-деформированное состояние конструкции, полученное на первой стадии, является стартовым для второй стадии расчета. Анализируя результаты расчетов, можно констатировать, что в запроектном состоя-

нии, при выходе из строя крайней колонны 18-21, в колоннах 16-19, 21-24, 22-25, 24-27 возникают усилия растяжения, а в колоннах среднего ряда возрастают усилия сжатия. Таким образом, тщательный расчетный анализ несущей системы здания позволяет вскрыть дополнительные резервы несущей способности, и при определенных конструктивных мероприятиях, требующих некоторого увеличения материалоемкости, можно обеспечить устойчивость здания к «прогрессирующему» разрушению.

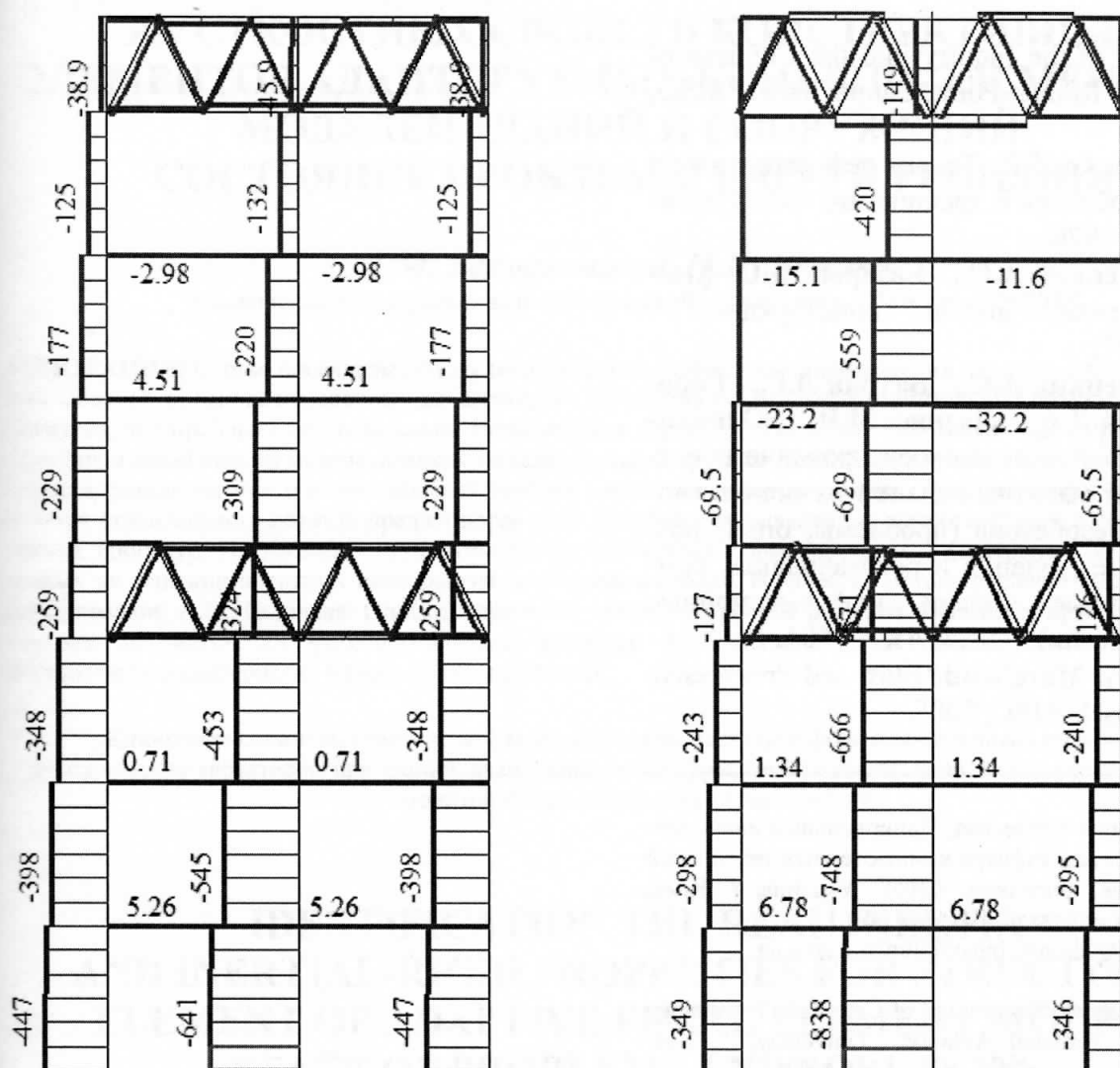


Рисунок 2. Этюра продольных сил  $N$ , т.

## ВЫВОДЫ

При проектировании конструкций с учетом сопротивления прогрессирующему обрушению принятие продуманных решений не должно приводить к значительному увеличению материалоемкости. Исследования американских ученых [1,5] показывают, что такое увеличение не должно превышать 5%. В основе такого утверждения лежит концепция о принятии таких конструктивных решений, которые создают условия для приспособления конструкций к новым форс-

мажорным ситуациям иногда даже за счет потери некоторых эксплуатационных качеств (большие перемещения, трещины и др.).

Такая концепция, безусловно, более плодотворна, чем, к сожалению, достаточно распространенные подходы о прямолинейном увеличении сечений оставшихся несущих элементов для восприятия, возникших в результате форс-мажорной ситуации усилий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Report of the Inquiry into the Collapse of Flats at Roman Point, Caning Town; MSO, 1968.
2. **Карпенко Н.И.** Теория деформирования железобетона с трещинами. –М.: Стройиздат, 1976.
3. **Городецкий А.С., Евзеров И.Д.** Компьютерные модели конструкций. – К.:2007.
4. **Городецкий А.С., Батрак Л.Г., Городецкий Д.А., Лазнюк М.В., Юсипенко С.В.** Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона (проблемы, опыт, возможные решения и рекомендации, компьютерные модели, информационные технологии). – К.: ФАКТ, 2004.
5. **Kirk A. Marchand** ‘Blast and Progressive Collapse’, AISC, 2005.

---

Барабаш Мария Сергеевна, Национальный авиационный университет, кафедра компьютерных технологий строительства, докторант, 03058, Украина, г. Киев, проспект Космонавта Комарова, дом 1  
e-mail: bmari@ukr.net, bmari@liraland.com.ua

Maria S. Barabash, Department of Computer Technology Construction, National Aviation University, 1, Kosmonavta Komarova, 03058, Kiev, UKRAINE  
e-mail: bmari@ukr.net, bmari@liraland.com.ua