

ISSN 2073-7416

# СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

BUILDING AND RECONSTRUCTION

№1 (63) 2016

январь-февраль



Теория инженерных сооружений.  
Строительные конструкции

The theory of engineering  
constructions. Construction  
design

Безопасность зданий  
и сооружений

Building and structure  
safety

Архитектура  
и градостроительство

Architecture  
and urban development

Строительные материалы  
и технологии

Building materials  
and technology

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL

# СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

Учредитель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»  
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)

Редакционный совет:  
Голенков В.А. д.т.н., проф., председатель  
Радченко С.Ю. д.т.н., проф.,  
зам. председателя  
Борзенков М.И. к.т.н., доц., секретарь  
Астафичев П.А. д.ю.н., проф.  
Иванова Т.Н. д.т.н., проф.  
Киричек А.В. д.т.н., проф.  
Колчунов В.И. д.т.н., проф.  
Константинов И.С. д.т.н., проф.  
Новиков А.Н. д.т.н., проф.  
Попова Л.В. д.э.н., проф.  
Степанов Ю.С. д.т.н., проф.

Главный редактор:  
Колчунов В.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.

Заместители главного редактора:  
Данилевич Д.В. к.т.н., доц.  
Колесникова Т.Н. д. арх., проф.  
Коробко В.И. д.т.н., проф.

Редколлегия:  
Бок Т. д.т.н., проф. (Германия)  
Бондаренко В.М. акад. РААСН, д.т.н., проф.  
Гордон В.А. д.т.н., проф.  
Емельянов С.Г. советник РААСН, д.т.н., проф.  
Карпенко Н.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.  
Клюева Н.В. советник РААСН, д.т.н., проф.  
Коробко А.В. д.т.н., проф.  
Король Е.А. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.  
Римшин В.И. чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.  
Сергейчук О.В. д.т.н., проф. (Украина)  
Серник И.Н. д.т.н., проф.  
Тамразян А.Г. д.т.н., проф.  
Тур В.В. д.т.н., проф. (Белоруссия)  
Турков А.В. д.т.н., проф.  
Федоров В.С. акад. РААСН, д.т.н., проф.  
Чернышов Е.М. акад. РААСН, д.т.н., проф.  
Шах Р. д.т.н., проф. (Германия)

Ответственный за выпуск:  
Савин С.Ю. к.т.н.

Адрес редакции:

302006, Россия, г. Орел,  
ул. Московская, 77  
Тел.: +7 (4862) 73-43-49  
[www.gu-unpk.ru](http://www.gu-unpk.ru)  
E-mail: [str\\_and\\_rek@mail.ru](mailto:str_and_rek@mail.ru)

Зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство:  
ПИ № ФС77-47354 от 03 ноября 2011 г.

Подписной индекс 86294 по объединенному каталогу «Пресса России»

© ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2014

## Содержание

### Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

Дорогов Ю.И. Об одном случае потери устойчивости стержня под действием следящей силы .....	3
Коробко А.В., Калашникова Н.Г. Основные частоты колебаний секториальных мембран с криволинейной частью, очерченной по дуге окружности .....	10
Локтионов А.П. Совершенствование эрмитовой аппроксимации непосредственно не измеряемой характеристики конструкции.....	18
Панасенко Ю.В. Опыт применения программного комплекса Stark ES в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко.....	28
Пятикрестовский К.П., Травуш В.И. Экспериментальные исследования характера НДС фанерных обшивок в составе пространственных конструкций.....	33

### Безопасность зданий и сооружений

Константинов И.С., Пилипенко О.В., Польщиков К.А., Иващук О.Д. К вопросу об обеспечения связь в процессе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах строительства.....	40
Юрьев Р.В. Оценка надежности здания РДЭС при сейсмических воздействиях.....	47

### Архитектура и градостроительство

Иващук О.А., Щербина Н.В., Федоров В.И. Повышение эффективности управления техносферной безопасностью территорий на основе улучшения качества спутниковых снимков земной поверхности.....	56
Сысоева Е.В., Магай А.А. Эволюция и перспективы развития основных строительных материалов для возведения большепролетных конструкций ...	64

### Строительные материалы и технологии

Акулова М.В., Селиверстова О.В. Влияние добавок-регуляторов структурообразования на долговечность тяжелого бетона.....	73
Булгаков А.Г. Построение математических моделей строительных роботизированных систем с учетом упругих деформаций.....	78
Ерофеев В.Т., Родин А.И., Сураева Е.Н., Богатов А.Д., Казначеев С.В. Биоцидный портландцемент.....	83
Плотников В.В., Ботаговский М.В., Плотникова С.В. Ограждающие конструкции зданий с использованием монолитного бетона низкой плотности на основе промышленных отходов.....	91
Тютюнов Д.Н., Федоров С.С., Клюева Н.В. Один из вариантов определения времени принятия решения в системе управления теплоснабжением зданий и сооружений.....	100
Христофоров А.И., Христофорова И.А., Ядькина Е.М. Разработка импортозамещающего материала на основе пенополивинилхлорида.....	106
Щепочкина Ю.А. Какой керамический кирпич выбрать: полнотелый или пустотелый?.....	112

Рецензия на книгу «Система управления разработкой и реализацией инвестиционных проектов и программ в корпорации и её дочерних обществах»..... 115

# BUILDING AND RECONSTRUCTION

The founder – federal state budgetary educational institution of the higher vocational training  
«State University – Educational-Science-Production Complex»  
(State University ESPC)

*Editorial council:*

**Golenkov V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.,

president

**Radchenko S.Y.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
vice-president

**Borzenkov M.I.** Candidat Sc. Tech.,  
Assistant Prof.

**Astafichev P.A.** Doc. Sc. Law., Prof.

**Ivanova T.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Kirichek A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Kolchunov V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Konstantinov I.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Novikov A.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Popova L.V.** Doc. Ec. Tech., Prof.

**Stepanov Y.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

*Editor-in-chief*

**Kolchunov V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

*Editor-in-chief assistants:*

**Danilevich D.V.** Candidat Sc. Tech., Assistant Prof.

**Kolesnikova T.N.** Doc. Arc., Prof.

**Korobko V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

*Editorial committee*

**Bock T.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Germany)

**Bondarenko V.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Gordon V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Emelyanov S.G.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Karpenko N.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Kljujeva N.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Korobko A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Korol E.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Rimshin V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Sergeychuk O.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)

**Serpik I.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Tamrazyan A.G.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Tur V.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Belorussia)

**Turkov A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Fyodorov V.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Chernyshov E.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Schach R.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Germany)

*Responsible for edition:*

**Savin S.Yu.** Candidat Sc. Tech

*The edition address:* 302006, Orel,

Street Moscow, 77

+7 (4862) 73-43-49

[www.gu-unpk.ru](http://www.gu-unpk.ru)

E-mail: [oantc@ostu.ru](mailto:oantc@ostu.ru)

Journal is registered in Russian federal service for monitoring communications, information technology and mass communications

The certificate of registration:

ПИ № ФС77-47354 from 03.04.11 г.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»  
86294

© State University ESPC, 2014

## Contents

### **Theory of engineering structures. Building units**

<b>Dorogov Yu.</b> About one case of loss of stability of the column under the influence of the watching force.....	3
<b>Korobko A., Kalashnikova N.</b> Basic frequencies of vibrations of sector membranes with curvilinear area defined in a circle arc .....	10
<b>Loktionov A.</b> Improving hermite approximation not directly measured characteristics of the structure.....	18
<b>Panasenko Yu.</b> Kucherenko CRSISC experience of Stark ES software applying.....	28
<b>Pyatikrestovsky K., Travush V.</b> Experimental studies of vat of plywood sheathing, which are part of spatial structures.....	33

### **Building and structure safety**

<b>Konstantinov I., Pilipenko O., Polshchykov K., Ivaschuk O.D.</b> The issue of communication in the process of prevention and liquidation of emergency situations at construction sites.....	40
<b>Yuriev R.</b> Assessment of reliability of diesel generating standby electric power station under seismic loads.....	47

### **Architecture and town-planning**

<b>Ivashchuk O.A., Shcherbinina N., Fedorov V.</b> Improving management effectiveness of technosphere safety of territories on the basis of improving the quality of satellite images of the earth's surface.....	56
<b>Sysoeva E., Magai A.</b> The evolution and the prospects of the development of the mainbuilding materials for the long-span structures construction .....	64

### **Construction materials and technologies**

<b>Akulova M., Seliverstova O.</b> The effect of additives-regulators of structure formation on the durability of heavy concrete.....	73
<b>Bulgakov A.</b> Construction of mathematical models of building robotic systems with consideration of elastic deformations .....	78
<b>Erofeev V., Rodin A., Suraeva E., Bogatov A., Kaznacheev S.</b> Biocidal portland cement .....	83
<b>Plotnikov V., Botagovskiy M., Plotnikova S.</b> Building envelope with the use of low density monolithic concrete based on industrial waste.....	91
<b>Tyutyunov D., Fedorov S., Klyueva N.</b> One of options of definition of time of decision-making in the control system of heat supply of buildings and constructions..	100
<b>Khrustoforov A., Khrustoforova I., Yadykina E.</b> Development of the import substituted material based on polyvinylchloride foams.....	106
<b>Shchepochkina Ju.</b> What ceramic brick to choose: solid or hollow?.....	112

### **Review of the book "Management system of development and implementation of investment projects and programs in the corporation and its subsidiaries" ..**

115

# **ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ.**

## **СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ**

УДК 539.384.4

ДОРОГОВ Ю.И.

### **ОБ ОДНОМ СЛУЧАЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕРЖНЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СЛЕДЯЩЕЙ СИЛЫ**

*Исследуется потеря устойчивости прямолинейного упругого стержня под действием следящей силы, направленной по касательной к оси стержня. Стержень шарнирно опирается по обоим концам: с одной стороны - шарнирно подвижно, с другой - шарнирно неподвижно. Рассматривается возможность существования смежных изогнутых форм равновесия в линеаризованной эйлеровой постановке. Для отыскания функции прогибов изогнутой оси стержня применяется изопериметрическое условие, выражающее неизменность длины стержня при продольном изгибе. Учёт смещения концов стержня и условия неизменности его длины в линеаризованной модели потери устойчивости позволяет получить вполне определённое уравнение изогнутой оси стержня.*

**Ключевые слова:** устойчивость стержня, следящая сила.

Традиционно, при исследовании потери устойчивости упругого стержня под действием следящей силы, рассматривают стержень с одним заделанным концом и одним свободным концом [1,2]. Следящая сила прикладывается к свободному концу. Известно, что в этом случае стержень не имеет устойчивых форм равновесия при нагрузках превосходящих критическую силу.

При исследовании потери устойчивости стержня, наряду с использованием точного дифференциального уравнения прогибов, применяется линеаризованная модель стержня [1-9]. В случае линеаризованной модели, при построении дифференциального уравнения прогибов стержня, пренебрегают квадратом первой производной этих прогибов. Получающееся решение оказывается определённым с точностью до неизвестного произвольного коэффициента, который не может быть определён из уравнений равновесия стержня или из условий его закрепления. Прогибы стержня оказываются неопределенными, либо бесконечными. На основании этого считается, что линеаризованная модель не позволяет исследовать поведение стержня при нагрузках, превосходящих критическую силу. Для исследования послекритического поведения стержня используют точное дифференциальное уравнение прогибов [7-14]. Причина неопределенности прогибов изогнутой оси стержня состоит в пренебрежении смещением его концов. Традиционно полагают, что концы стержня остаются неподвижными в процессе его изгиба, а его длина может неограниченно увеличиваться. Это допущение противоречит условиям нагружения сжимаемого стержня. На самом деле, длина стержня при сжатии может только уменьшиться. Это уменьшение не значительно по сравнению с перемещением концов стержня.

В данной работе исследуется процесс потери устойчивости упругого прямолинейного стержня, нагруженного силой  $P$ , направленной по касательной к изогнутой оси стержня (рис.1). Концы стержня закреплены шарнирно. Один конец стержня неподвижен, а другой претерпевает смещение в процессе выпучивания стержня. Расстояние между концами стержня  $l$  изменяется. Это расстояние равно длине проекции изогнутой оси стержня на его первоначально прямолинейную ось. При этом длина стержня  $L$  предполагается неизменной.

Начало системы координат расположено в неподвижном конце стержня (рис.1.), а ось  $Ox$  направлена вдоль первоначально прямолинейной оси стержня в сторону его подвижного конца. Ось  $Oy$  направлена в сторону выпуклости стержня и перпендикулярна оси  $Ox$ .

Предположим, что существует изогнутая форма равновесия стержня, смежная с прямолинейной формой равновесия. Касательная к изогнутой оси стержня наклонена к оси  $Ox$ .

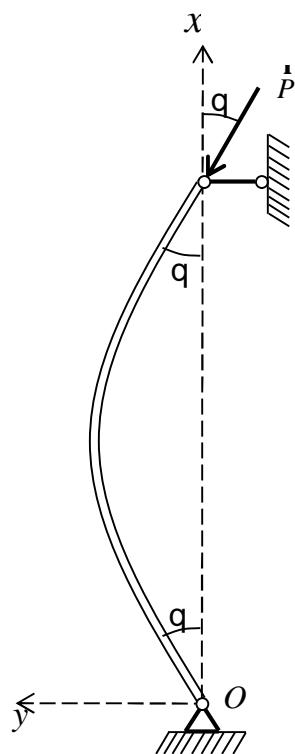


Рисунок 1 — Схема нагружения стержня следящей силой

Угол наклона касательной на конце стержня обозначим  $q$ . Со стороны подвижной опоры на стержень действует сосредоточенная реакция  $R$ , значение которой может быть найдено из условия равенства нулю момента сил, приложенных к стержню, относительно неподвижной опоры:

$$R = P \sin(q).$$

Реакция неподвижной опоры направлена вдоль оси  $Ox$  в сторону стержня и равна проекции следящей силы на эту ось:

$$P_x = P \cos(q).$$

Равенство момента нормальных напряжений в поперечном сечении стержня и момента силы  $P_x$  приводит к дифференциальному уравнению

$$EJy'' + P \cos(q) y = 0, \quad (1)$$

где  $E$  — модуль Юнга материала стержня;  $J$  — момент инерции поперечного сечения стержня.

Дифференцируя уравнение (1) дважды по переменной  $x$ , приведём его к виду:

$$y^{IV} + a^2 y'' = 0, \quad (2)$$

где  $a = \sqrt{P \cos(q) / EJ}$ .

В соответствии с условиями закрепления, граничные условия запишутся в виде:

$$y(0) = y(l) = y''(0) = y''(l) = 0.$$

Выражение (2) является однородным дифференциальным уравнением четвёртого порядка с постоянными коэффициентами. Его общее решение имеет вид:

$$y(x) = C_1 + C_2 x + C_3 \cos(ax) + C_4 \sin(ax).$$

Подставив в выражение для  $y(x)$  граничные условия, получим систему для определения неизвестных постоянных:

$$A \times \bar{C} = 0, \quad (3)$$

где  $A$  — основная матрица системы;  $\bar{C} = \|C_i\|$  — матрица столбец неизвестных  $C_i$  ( $i=1, \dots, 4$ ).

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & l & \cos(al) & \sin(al) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -a^2 \cos(al) & -a^2 \sin(al) \end{vmatrix}.$$

Однородная система (3) имеет нетривиальное решение, если её определитель равен нулю:  $|A|=0$ . Выполняя элементарные преобразования над строками и столбцами определителя  $|A|$ , получим условие существования нетривиального решения уравнения в виде:

$$\sin(al) = 0.$$

Отсюда  $al = pk$ . Наименьшему ненулевому значению  $a = p/l$  соответствует продольная сила, равная

$$P = \frac{p^2 E J}{l^2 \cos(\varphi)}.$$

Следовательно, продольная сила и длина проекции связаны соотношением

$$P = P_e \frac{L^2}{l^2 \cos(\varphi)}, \quad (4)$$

где  $P_e = p^2 E J / L^2$  — сила Эйлера для шарнирно опёртого стержня длины  $L$ .

Обозначим  $r = P/P_e$  — относительное значение действующей нагрузки. Тогда из уравнения (4) получаем выражение зависимости длины проекции стержня от сжимающей силы

$$l = L / \sqrt{r \cos(\varphi)}. \quad (5)$$

Таким образом, поставленной краевой задаче удовлетворяет однопараметрическое семейство кривых  $y(x) = C \sin(px/l)$ .

Неопределенность постоянной  $C$ , является следствием допущения о возможности неограниченного удлинения стержня в процессе потери устойчивости прямолинейной формы равновесия. Предполагая, что длина стержня  $L$  не претерпевает существенного изменения в сравнении со смещением его концов и уменьшением проекции стержня  $l$ , получим дополнительное изопериметрическое условие для определения постоянной  $C$ :

$$L = \int_0^l \sqrt{1 + (y')^2} dx = \text{const}. \quad (6)$$

Вначале процесса потери устойчивости изогнутая ось стержня достаточно пологая и тангенсы углов наклона касательной малы по сравнению с единицей. Раскладывая подынтегральное выражение в ряд Маклорена с двумя первыми членами и интегрируя его, получим приближённое равенство:

$$L \approx \int_0^l \sqrt{1 + \frac{(y')^2}{2}} dx = \int_0^l \sqrt{1 + \frac{p^2 C^2}{2l^2} \cos^2 \frac{px}{l}} dx = l + \frac{p^2 C^2}{4l}. \quad (7)$$

Из последнего равенства выразим коэффициент  $C$  через длину проекции  $l$ :

$$C = \frac{2}{p} \sqrt{l(L - l)}. \quad (8)$$

Тангенс угла наклона касательной на конце стержня равен:

$$\tan(\varphi) = y'(0) = Ca. \quad (9)$$

Подставляя в последнее уравнение величину  $C$  по формуле (8) и учитывая значение коэффициента  $a$ , после преобразования получим:

$$\sqrt{\frac{L}{l} - 1} = \frac{1}{2} \tan(\varphi).$$

Возведём последнее равенство в квадрат. Учитывая формулу (5), перепишем его в виде:

$$\sqrt{r \cos(\varphi)} = 1 + \frac{1}{4} \tan^2(\varphi).$$

Отсюда, получим зависимость относительной сжимающей силы от угла поворота концов стержня:

$$r = \frac{(1 + 0,25 \operatorname{tg}^2(q))^2}{\cos(q)}.$$

На рисунке 2 изображён график этой зависимости. Из этого графика видно, что каждому значению относительной нагрузки  $r$  соответствует определённое значение угла наклона касательной  $q$  на концах стержня.

С увеличением прогибов тангенсы углов наклона касательной увеличиваются по всей длине стержня. Разложение подынтегрального выражения в ряд Маклорена (7) справедливо при малых значениях углов между касательной к изогнутой оси стержня и осью  $Ox$ . При больших углах это разложение может приводить к значительной погрешности при вычислении прогибов и нагрузки.

Чтобы уточнить значение величины  $r$  при больших углах  $q$ , исследуем подынтегральную функцию выражения (6), используя замену  $y \approx m \cos(t)$

$$f(t) = \sqrt{1 + m^2 \cos^2(t)}.$$

Параметр  $m = Ca = Cp/l$  не превосходит  $\pi/2$ , так как прогиб оси стержня в срединном сечении  $y(l/2) = C$  не может быть больше, чем половина длины стержня.

Рассмотрим вспомогательную функцию

$$g(t) = \sqrt{1 + m^2} - 1 \approx \frac{1}{2} m^2 t^2 + 1,$$

и сравним её с исследуемой подынтегральной функцией  $f(t)$ .

Найдём наибольшее значение разности двух функций

$$d(t) = f(t) - g(t) = \sqrt{1 + m^2 \cos^2(t)} - \sqrt{1 + m^2} - 1 \approx \frac{1}{2} m^2 t^2 - 1$$

при значениях параметра  $t \in [0; \pi/2]$ . Для этого воспользуемся необходимым условием экстремума функции и приравняем её производную к нулю.

$$d'(t) = a \sin(2t) \sqrt{1 + m^2} - 1 - \frac{m^2}{2\sqrt{1 + m^2 \cos^2(t)}} = 0.$$

Отсюда получаем  $t = \pi k/2$  ( $k \in \mathbb{Z}$ ) или

$$\sqrt{1 + m^2 \cos^2(t)} = \frac{m^2}{2\sqrt{1 + m^2} - 1} = \frac{\sqrt{1 + m^2} + 1}{2}.$$

В первом случае, когда  $t = \pi k/2$ , получим  $d(t) = 0$ . Во втором случае

$$d = \frac{\sqrt{1 + m^2} - 1}{4m^2}.$$

Найдём отношение максимальной разности к значению функции  $f(t)$  в точке, где данная разность приобретает наибольшее абсолютное значение. Тогда

$$\frac{d}{f} = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{1 + m^2} - 1}{m}.$$

Полученное отношение является бесконечно малой величиной при  $m \rightarrow 0$ , непрерывно зависит от  $m$  при  $m \in (0; \pi/2]$  и его производная положительна. Следовательно, наибольшего значения на отрезке  $m \in [0; \pi/2]$  это отношение достигает при значении  $m = \pi/2$ .

$$\max_{m \in [0; \pi/2]} \frac{\frac{a \dot{\theta}}{C} \div \frac{\ddot{\theta}}{\dot{\theta}}}{\dot{\theta} f \ddot{\theta}} \approx 0,0453.$$

Таким образом, вспомогательная функция  $g(t)$  является достаточно хорошим приближением для исследуемой подынтегральной функции  $f(t)$ . Подставим в интеграл, стоящий в правой части формулы (6), функцию  $g(t)$  вместо функции  $f(t)$ . Получим

$$L \approx \int_0^l \sqrt{1+C^2 a^2} - 1 \div \cos^2(ax) + 1 \div \dot{\theta}^2 dx = \sqrt{1+C^2 a^2} - 1 \div \dot{\theta}^2 + l.$$

Выразим из последнего равенства  $C$ .

$$C = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{L}{\dot{\theta}^2} - 1}.$$

Подставим  $C$  в уравнение (9) и выразим из него длину проекции стержня

$$l = \frac{2L}{\sqrt{\tan^2(\theta) + 1 + 1}} = \frac{L \cos(\theta)}{\cos^2(\theta/2)}. \quad (10)$$

Приравнивая правые части уравнений (5) и (10), и выражая из полученного равенства  $\theta$ , получим

$$\theta = \frac{\cos^4(\theta/2)}{\cos^3(\theta)}.$$

На рисунке 3 изображён график этой зависимости.

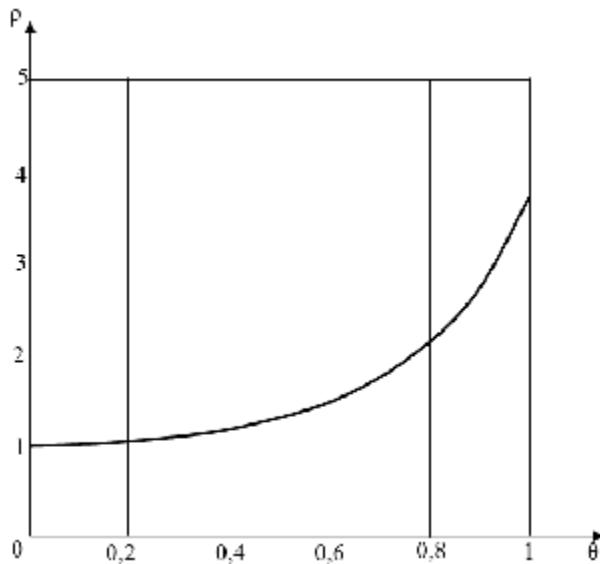


Рисунок 2 - Зависимость нагрузки  $r$  от величины угла  $\theta$  наклона касательной

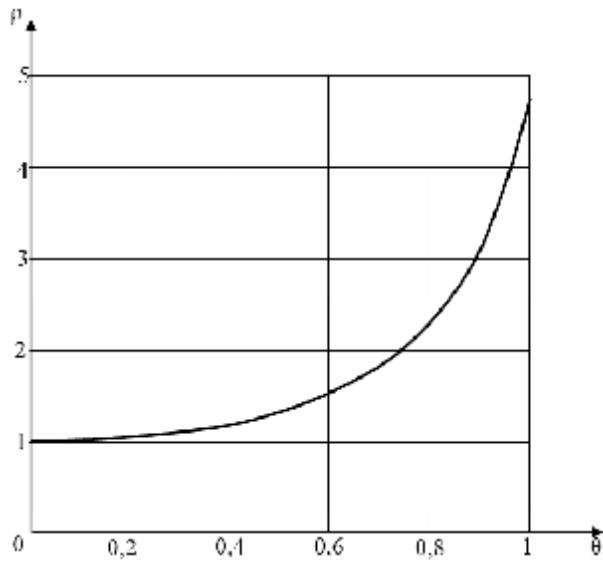


Рисунок 3 - Уточненный график зависимости нагрузки  $r$  от величины угла  $\theta$  наклона касательной

На основании проведённого исследования можно сделать следующие выводы.

- 1) Изопериметрическое условие (6) позволяет применять линеаризованную модель упругого изогнутого стержня для исследования его поведение после потери устойчивости прямолинейной формы равновесия.
- 2) Каждому значению нагрузки, превышающему критическое значение, соответствует единственная кривая прогиба, которая является устойчивой.
- 3) Учёт смещения концов стержня и условия неизменности его длины в линеаризованной модели потери устойчивости позволяет получить вполне определённое уравнение изогнутой оси стержня.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем [Текст]: научное издание / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 984 с.
2. Пановко, Я.Г. Устойчивость и колебания упругих систем. Современные концепции, парадоксы и ошибки [Текст] / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова. – М.: Наука, 1987. – 352 с.
3. Дорогов, Ю.И. О нисходящей ветви диаграммы деформирования [Текст] / Ю.И. Дорогов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – № 2. – С. 281–288.
4. Дорогов, Ю.И. О несущей способности стержня с инородной прослойкой [Текст] / Ю.И. Дорогов // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 2001. – № 5. – С. 11–15.
5. Дорогов, Ю.И. О развитии трещины в балке при изгибе с полной диаграммой [Текст] / Ю.И. Дорогов // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 2002. – № 4. – С. 30–35.
6. Дорогов, Ю.И. Разрушение балки на упругом основании [Текст] / Ю.И. Дорогов // Изв. ВУЗов. Машиностроение, 2005. № 4. С. 31–34.
7. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела [Текст]: учебное пособие для вузов / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
8. Дорогов, Ю.И. Об устойчивости формы незакреплённого упругого стержня с жёсткими полками на концах [Текст] / Ю.И. Дорогов // Прикладная математика и механика. – 2013. – Том 77. – Вып. 3. – С. 462–473.
9. Dorogov, Yu.I. The stability of the shape of an unattached elastic rod with stiff flanges on its ends [Text] / Yu.I. Dorogov // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2013. – № 3 – P. 338–345.
10. Дорогов, Ю.И. Устойчивость стержня с жёсткими окончаниями [Текст] / Ю.И. Дорогов // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2013. – № 3 – С. 16–21.
11. Дорогов, Ю.И. Устойчивость стержня с искривленными торцами [Текст] / Ю.И. Дорогов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2012. – № 2. – С. 255–266.
12. Дорогов, Ю.И. О потере устойчивости абсолютно жесткого стержня с разрушающейся опорой [Текст] / Ю.И. Дорогов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2006. – № 3. – С. 300–311.
13. Дорогов, Ю.И. Устойчивость упругого стержня с разрушающейся опорой [Текст] / Ю.И. Дорогов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – № 1. – С. 84–96.
14. Дорогов, Ю.И. Продольный изгиб стержня с разрушающимися заделками [Текст] / Ю.И. Дорогов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – № 4. – С. 575–586.

#### Ю.И. Дорогов

Филиал ГОУ ВПО "Московский энергетический институт (НИУ)" в г. Волжском, г. Волжский  
Кандидат технических наук, доцент кафедры "Высшая математика"

E-mail: [ydorogov@yandex.ru](mailto:ydorogov@yandex.ru)

---

Yu. DOROGOV

### ABOUT ONE CASE OF LOSS OF STABILITY OF THE COLUMN UNDER THE INFLUENCE OF THE WATCHING FORCE

*Loss of stability of a rectilinear elastic column under the influence of the watching force is investigated. The ends of a column are fixed by means of hinges. The problem is solved directed by Euler. Adjacent curved forms of balance of a column are looked for. Additional condition are expressed by an invariance of length of a column. The offset of the ends of the rod and length immutability conditions of its in the linearized model of the buckling allow to obtain analytical equation of the curved rod axis.*

**Key words:** buckling of the column, watching force.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Vol'mir, A.S. Ustoychivost' deformiruyemykh sistem [Tekst]: nauchnoye izdaniye / A.S. Vol'mir. – M.: Nauka, 1967. – 984 s.
2. Panovko, YA.G. Ustoychivost' i kolebaniya uprugikh sistem. Sovremennyye kontseptsii, paradoksy i oshibki [Tekst] / YA.G. Panovko, I.I. Gubanova. – M.: Nauka, 1987. – 352 s.
3. Dorogov, YU.I. O niskhodyashchey vetyi diagrammy deformirovaniya [Tekst] / YU.I. Dorogov // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy. – 2009. – № 2. – S. 281–288.
4. Dorogov, YU.I. O nesushchey sposobnosti sterzhnya s inorodnoy prosloykoy [Tekst] / YU.I. Dorogov // Izv. VUZov. Mashinostroyeniye. – 2001. – № 5. – S. 11–15.
5. Dorogov, YU.I. O razvitiu treshchiny v balke pri izgibe s polnoy diagrammoy [Tekst] / YU.I. Dorogov // Izv. VUZov. Mashinostroyeniye. – 2002. – № 4. – S. 30–35.
6. Dorogov, YU.I. Razrusheniye balki na uprugom osnovanii [Tekst] / YU.I. Dorogov // Izv. VUZov. Mashinostroyeniye, 2005. № 4. S. 31–34.
7. Rabotnov, YU.N. Mekhanika deformiruyemogo tverdogo tela [Tekst]: uchebnoye posobiye dlya vuzov / YU.N. Rabotnov. – M.: Nauka, 1988. – 712 s.
8. Dorogov, YU.I. Ob ustoychivosti formy nezakreplennogo uprugogo sterzhnya s zhostkimi polkami na kontsakh [Tekst] / YU.I. Dorogov // Prikladnaya matematika i mekhanika. – 2013. – Tom 77. – Vyp. 3. – S. 462–473.
9. Dorogov, Yu.I. The stability of the shape of an unattached elastic rod with stiff flanges on its ends [Text] / Yu.I. Dorogov // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2013. – № 3 – P. 338–345.
10. Dorogov, YU.I. Ustoychivost' sterzhnya s zhostkimi okonchaniyami [Tekst] / YU.I. Dorogov // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. – 2013. – № 3 – S. 16–21.
11. Dorogov, YU.I. Ustoychivost' sterzhnya s iskrivlennymi tortsami [Tekst] / YU.I. Dorogov // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy. – 2012. – № 2. – S. 255–266.
12. Dorogov, YU.I. O potere ustoychivosti absolyutno zhestkogo sterzhnya s razrushayushcheysya oporoy [Tekst] / YU.I. Dorogov // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy. – 2006. – № 3. – S. 300–311.
13. Dorogov, YU.I. Ustoychivost' uprugogo sterzhnya s razrushayushcheysya oporoy [Tekst] / YU.I. Dorogov // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy. – 2010. – № 1. – S. 84–96.
14. Dorogov, YU.I. Prodol'nyy izgib sterzhnya s razrushayushchimisyia zadelkami [Tekst] / YU.I. Dorogov // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy. – 2010. – № 4. – S. 575–586.

**Yu. Dorogov**

Branch of Moscow Power Engineering Institute (National Research University) in Volzhskiy, Volzhskiy

Candidate of technical sciences, associated professor of the mathematics department

E-mail: [ydorogov@yandex.ru](mailto:ydorogov@yandex.ru).

## ОСНОВНЫЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ СЕКТОРИАЛЬНЫХ МЕМБРАН С КРИВОЛИНЕЙНОЙ ЧАСТЬЮ, ОЧЕРЧЕННОЙ ПО ДУГЕ ОКРУЖНОСТИ

*В статье с помощью метода интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ) построена универсальная аппроксимирующая функция для определения основных частот колебаний секториальных мембран с криволинейным участком, очерченным по дуге окружности. Для всех секториальных мембран в качестве «опорных» приняты круглая мембрана и мембрана в виде кругового сектора с вершиной в центре окружности. Полученные зависимости удовлетворяют с высокой точностью известным точным решениям задачи об основной частоте колебаний мембран в виде круговых секторов и могут быть использованы как для непосредственного расчета мембран указанных форм, так и для получения опорных решений МИКФ.*

**Ключевые слова:** секториальные мембранны, основная частота колебаний, метод интерполяции по коэффициенту формы, опорные решения, аппроксимирующие функции.

### Введение

Мембранны широко распространены в строительстве и машиностроении в качестве несущих элементов конструкций, воспринимающих как статические, так и динамические нагрузки. При проведении расчетов таких конструкций на динамические воздействия в первую очередь определяются их собственные частоты колебаний. Среди множества форм мембран особое место занимают мембранны в виде сектора. Методов точного расчета таких мембран нет, применяются, как правило, приближенные аналитические и численные методы [1], среди которых особо выделяется метод интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ), теоретические основы которого изложены в монографии [2]. Этот метод позволяет без решения дифференциальных уравнений находить оценки интегральных физических характеристик упругих пластинок и мембран (максимальный прогиб при поперечном изгибе, основную частоту колебаний и др.). В основу МИКФ положены изопериметрические свойства коэффициента формы пластинок и мембран  $K_f$ , которые подробно исследованы в работах [2, 3].

### 1. Коэффициент формы мембран

Коэффициентом формы произвольной двумерной области называют контурный интеграл вида:

$$K_{fa} = \frac{\oint_L ds}{h}, \quad (1)$$

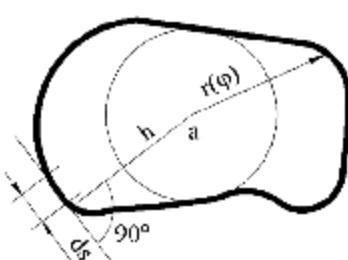


Рисунок 1

где  $ds$  – элементарный участок контура некоторой двумерной области,  $h$  – перпендикуляр, опущенный из произвольной точки, называемой полюсом, на участок контура  $ds$  (рис. 1). Как показано в монографии [2], эта геометрическая характеристика является геометрическим аналогом интегральных физических характеристик в двумерных задачах строительной механики, теории упругости и пластичности и широко используется при решении двумерных задач математической физики [4] и теории упругости [2]. В связи с этим многие сложные двумерные задачи теории упругости сводятся к решению элементарной геометрической задачи – анализу изменения свойств коэффициента формы при различных геометрических преобразованиях заданной области.

В любой выпуклой области (рисунок 1) существует единственная точка «а», для которой значение коэффициента формы минимально [4]:  $\min K_{fa} = K_f$ . Именно эти значения ко-

эффективности формы используются далее в рассматриваемом методе. В работах [2, 3] приведены формулы для определения  $K_f$  выпуклых областей различного очертания и подробные исследования его изопериметрических свойств. Поскольку в настоящей статье речь пойдет о секториальных мембранах, приведем расчетные формулы для определения коэффициента формы таких мембран, позаимствовав результаты из монографии [2].

*Круговой сектор с вершиной в центре окружности.* Для таких фигур (рис. 2):

$$K_f = \min 2 \left[ \operatorname{ctg} \frac{a}{2} + \operatorname{ctg} b + \frac{1}{\sin g} \begin{cases} \operatorname{arctg}(\sin g g_j), & j < p/2 \\ \operatorname{arctg}(\sin g g_j), & j > p/2 \end{cases} \right] \quad (2)$$

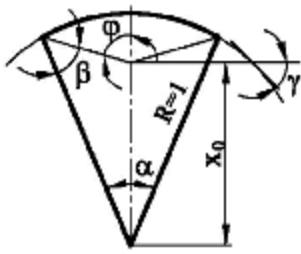


Рисунок 2

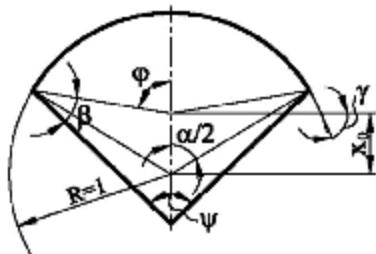


Рисунок 3

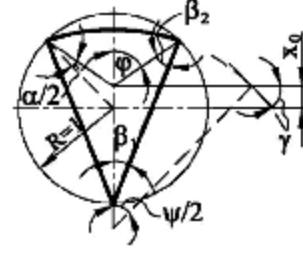


Рисунок 4

*Круговой сектор с вершиной, расположенной на диаметре.* Для таких фигур (рисунок 3):

$$K_f = \min 2 \left[ \operatorname{ctg} \frac{y}{2} + \operatorname{ctg} b + \frac{1}{\sin g} \begin{cases} \operatorname{arctg}(\sin g g_j), & j < p/2 \\ \operatorname{arctg}(\sin g g_j), & j > p/2 \end{cases} \right] \quad (3)$$

*Сектор с вершиной, расположенной на окружности, радиус криволинейного участка которого изменяется от единицы до бесконечности.* Для таких фигур (рис. 4):

$$K_f = \min 2 \left[ \sum_{i=1}^2 \operatorname{ctg} b_i + \frac{1}{\sin g} \begin{cases} \operatorname{arctg}(\sin g g_j), & j < p/2 \\ \operatorname{arctg}(\sin g g_j), & j > p/2 \end{cases} \right] \quad (4)$$

Таблицы значений  $K_f$  для секторов, подсчитанных по формулам (2)...(4), приведены в монографиях [2, 3].

## 2. Функциональная связь собственной частоты колебаний мембран с коэффициентом формы

Рассмотрим дифференциальное уравнение свободных колебаний шарнирно опертых по контуру и равномерно растянутых мембран [1]:

$$\frac{\mathbb{P}^2 w}{\mathbb{P}x^2} + \frac{\mathbb{P}^2 w}{\mathbb{P}y^2} = -l^2 w \quad \text{или} \quad D^2 w + l^2 w = 0, \quad (5)$$

где  $w(x, y)$  – функция прогибов мембраны при свободных колебаниях;  $l = w \sqrt{m/p} \times \sqrt{A}$  – собственное значение дифференциального уравнения (5);  $\omega$  – собственная частота колебаний мембраны;  $p$  – усилие равномерного растяжения мембраны по контуру;  $m$  – масса единицы

площади;  $A$  площадь мембранны. Подставляя в это уравнение функцию прогибов  $w(x,y) = w_0 f(x,y)$  (где  $w_0$  – максимальный прогиб мембранны;  $f(x,y)$  – безразмерная единичная функция, удовлетворяющая условию  $0 \leq f(x,y) \leq 1$ ), после преобразований получим:

$$\Delta^2 f = -\lambda^2 f.$$

Проинтегрируем правую и левую части этого уравнения по площади мембранны и решим его относительно параметра  $\lambda^2$ :

$$\lambda^2 = \iint_A \Delta^2 f dA / \iint_A f dA. \quad (6)$$

Проведем преобразование выражения (6), подставляя в него функцию прогибов в виде однопараметрической функции  $f(x,y) = g(\rho) = g[t/r(j)]$ , где  $t, \varphi$  – полярные координаты;  $\rho$  – безразмерная полярная координата;  $r(\varphi)$  – уравнение контура мембранны в полярных координатах.\*

Сначала рассмотрим знаменатель дроби (6) и запишем его в полярных координатах:

$$\iint_A f dA = \iint_0^{2\pi} \int_0^r g(r) r^2 dr d\varphi.$$

Умножим и разделим подынтегральное выражение на  $r^2$  и преобразуем полученное соотношение.

$$\begin{aligned} \iint_0^{2\pi} \int_0^r g(r) \frac{1}{r^2} r^2 dr d\varphi &= \iint_0^{2\pi} \int_0^r g(r) r dr d\varphi = \\ &= \iint_0^{2\pi} \int_0^1 g(r) r dr d\varphi = 2A \int_0^1 g(r) r dr. \end{aligned}$$

Тогда окончательно,

$$\iint_A f dA = 2A \int_0^1 g(r) r dr. \quad (7)$$

Преобразуем оператор Лапласа, входящий в числитель дроби (6), представив предварительно его в полярных координатах:

$$\iint_A \Delta^2 f(x,y) dA = \iint_A (f_{xx} + f_{yy}) dA = \iint_A \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} f_r + \frac{1}{r^2} f_{rr} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} dA,$$

где  $f_t$  – первая производная от  $f$  по  $t$ ;  $f_{xx}, f_{yy}$  и  $f_{rr}$  – вторые производные от  $f$  соответственно по  $x, y$  и  $r$ . Найдем значения вторых производных от функции  $f(x,y) = f(t,j) = g[t/r(j)]$ .

$$f_t = \frac{\partial g}{\partial t} \frac{\partial \frac{\partial f}{\partial t}}{\partial r} = g \frac{\partial^2 f}{\partial r \partial t} = g \frac{\partial f}{\partial r} \frac{1}{r}; \quad f_{rr} = \frac{\partial}{\partial r} \left( g \frac{\partial f}{\partial r} \right) = g \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} = -g \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \frac{\partial r}{\partial j} = -g \frac{\partial f}{\partial r} \frac{r}{r^2}.$$

$$f_{rr} = \frac{\partial g}{\partial r} \frac{\partial \frac{\partial f}{\partial r}}{\partial r} = g \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \frac{1}{r} = g \frac{\partial f}{\partial r} \frac{1}{r^2};$$

$$f_{rr} = -\frac{\partial}{\partial r} \left( g \frac{\partial f}{\partial r} \right) = g \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \frac{\partial r}{\partial j} = g \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \frac{r}{r^2}.$$

\* Аналогичный подход использовался ранее Д. Пойа при исследовании задач математической физики [4].

$$- g \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = g \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - g \frac{r^2 \psi'' - 2r\psi'}{r^4}.$$

Подставим значения найденных производных в оператор Лапласа:

$$\begin{aligned} \iint_A (f_{tt} + \frac{1}{t} f_t + \frac{1}{t^2} f_{ttt}) dA &= \iint_0^r g \frac{1}{r^2} + \frac{1}{t} g \frac{1}{r} + \frac{1}{t^2} g \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - g \frac{r^2 \psi'' - 2r\psi'}{r^4} dt dr = \\ &= \iint_0^r g \frac{1}{r^2} + \frac{r\psi'}{r^2} + g \frac{1}{r^2} + 2 \frac{r\psi'}{r^2} - \frac{r\psi''}{r^2} dt dr = \\ &= \int_0^r g \frac{1}{r^2} + \frac{r\psi'}{r^2} dr + \int_0^r g \frac{1}{r^2} + 2 \frac{r\psi'}{r^2} - \frac{r\psi''}{r^2} dr = K_f \int_0^r [g(r)r + g(r)] dr. \end{aligned}$$

В этих преобразованиях использованы формулы

$$K_f = \int_0^r g \frac{1}{r^2} + \frac{r\psi'}{r^2} dr = \int_0^r g \frac{1}{r^2} + 2 \frac{r\psi'}{r^2} - \frac{r\psi''}{r^2} dr,$$

которые известны из монографии [2]. Тогда окончательно,

$$\iint_A \mathcal{D}^2 f(x, y) dA = \iint_A \mathcal{D}^2 g(r) dA = K_f \int_0^r [g(r)r + g(r)] dr. \quad (8)$$

Подставим выражения (7) и (8) в (6):

$$I^2 = - \frac{K_f}{2A} \int_0^r [g(r)r + g(r)] dr \Big/ \int_0^r g(r) dr. \quad (9)$$

Значения определенных интегралов в этом выражении являются постоянными числами, зависящими от точности выбора функции  $g(r)$ . Поэтому их можно внести в эту формулу в виде коэффициента пропорциональности, тогда

$$I^2 \approx K_1 \frac{K_f}{A}. \quad (10)$$

Знак приближенного равенства поставлен в этом выражении в связи с тем, что ни для одной из форм мембран невозможно подобрать функцию прогибов в виде однопараметрической функции  $g(r)$ , которая бы точно удовлетворяла известным решениям.

Выражение (6) показывает, что значение параметра  $\lambda$  функционально зависит от коэффициента формы мембраны и, как показано в работе [2], для ограниченного подмножества мембран, связанных одним непрерывным или дискретным геометрическим преобразованием, аппроксимирующую функцию можно выбирать в виде степенных зависимостей:

$$w = K_w (K_f)^n \frac{p}{Am}; \quad (11)$$

$$w = K_w \sqrt{K_f^2 + C} \frac{p}{Am}, \quad (12)$$

где  $K_w$ ,  $n$ ,  $C$  – неизвестные параметры, определяемые из «опорных» решений.

### 3. Сущность МИКФ

В монографии [2] подробно изложена методика применения метода интерполяции по коэффициенту формы к решению некоторых двумерных задач теории упругости. Сущность этого метода заключается в следующем. Пусть необходимо записать аналитическое решение

для определения основной частоты колебаний некоторого подмножества мембран, полученных с помощью непрерывного или дискретного геометрического преобразования. При анализе форм мембран этого подмножества следует выделить среди них хотя бы две формы, решения для которых известны (опорные решения), или их можно легко получить известными методами. Параметры одной из таких мембран обозначим через  $K_{f1}$  и  $w_1$ , а другой – через  $K_{f2}$  и  $w_2$ . Используя аппроксимирующую функцию в виде выражений (11) и (12) и прием интерполяции опорных решений, получим аналитическую зависимость, описывающую изменение основной частоты колебаний рассматриваемого подмножества мембран. Например, если использовать аппроксимирующую функцию (11), то по методике МИКФ получим:

$$w = K \left( \frac{K_f}{K_{f1}} \right)^{\frac{1}{\ln(w_2/w_1)}} \frac{p}{Am},$$

где коэффициент пропорциональности  $K$  определяется путем подстановки в это выражение любого опорного решения.

Для многих форм мембран можно найти такое их подмножество, значения коэффициента форм которых ограничено с двух сторон – свойство двусторонней ограниченности. Ввиду установленной физико-геометрической аналогии между интегральными физическими характеристиками мембран и их коэффициентом формы, для решения задачи достаточно проследить, как изменяется коэффициент формы определенного множества мембран, связанных одним непрерывным геометрическим преобразованием, а затем путем масштабирования оценить качественные и количественные изменения искомой интегральной физической характеристики мембраны. Так например, все значения основных частот колебаний параллограммных мембран, представленные в координатных осях  $W - K_f$ , ограничены с двух сторон значениями частот прямоугольных и ромбических мембран.

#### 4. Мембранны с выпуклым контуром в виде кругового сектора с вершиной в центре круга

Рассмотрим известные решения для собственных значений дифференциального уравнения (5) для секториальных мембран с выпуклым контуром в виде кругового сектора с вершиной, расположенной в центре круга (рис. 5-д), позаимствованные из справочника [1], которые представлены в таблице 1 (колонка 4). Значения частотного параметра приведены в колонке 5.

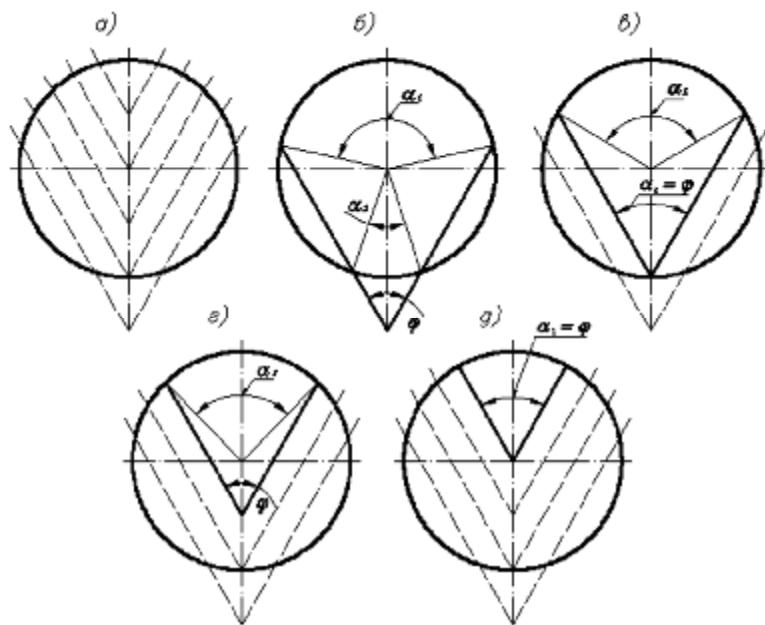


Рисунок 5 – Геометрические преобразования круглой мембранны в секториальную

Таблица 1 – Основные частоты колебаний мембран в виде кругового сектора с вершиной в центре окружности,  $\omega = K_w p / (Am)$

№ п/п	$\varphi^o$ (рад) <sup>o</sup>	$K_f$	$\lambda$	$\omega$	$\omega$ по (13)	Разница, %
1	2	3	4	5	6	7
1	360 (6,2832)	$2\pi$	2,484	18,156		
2	180 (3,1416)	8,7915	3,832	23,062	23,067	0,02
3	90 (1,5708)	8,1679	5,135	20,715	20,679	0,17
4	60 (1,0472)	8,8855	6,379	21,314	21,354	0,19
5	45 (0,7854)	9,8878	7,586	22,613	22,650	0,16
7	30 (0,5236)	12,1668	9,936	25,846	25,833	0,05
9	20 (0,3491)	15,8098	13,354	31,126	31,089	0,12

Примечание –  $\varphi$  – угол кругового сектора.

Поскольку решения для мембран в виде кругового сектора с вершиной в центре окружности будут в дальнейшем использоваться в качестве опорных, целесообразно построить как можно более точную функцию, аппроксимирующую известные решения, приведенные в таблице 1 (колонка 5). Используя программный комплекс *Table curve*, получим:

$$\omega = \frac{16,335 + 64,215 \alpha}{1 + 17,408 \alpha - 1,042 \alpha^2} \frac{p}{\phi} \quad (13)$$

где угол  $\alpha$  подставляется в радианах. Результаты расчета по этой формуле приведены в колонке 6 таблицы 1. Сопоставление точных решений с результатами, полученными по формуле (9), приведено в колонке 7.

### 5. Мембранны в виде круга с двумя отсеченными сегментами, симметричными относительно диаметра

Различные формы мембран в виде круга с двумя отсеченными сегментами, симметрично расположеными относительно диаметра, представлены на рисунке 5, а. Хорды сегментов пересекаются друг с другом в точке, расположенной на оси симметрии либо за пределами круга (схема б), либо на окружности (схема в)), либо внутри круга (схемы г и д)). Такие формы мембран можно получить путем постепенного и последовательного отсечения от круга его частей секущими, параллельно смещающимися к центру. Из рисунка 5 видно, что две крайние фигуры (круг и сектор с полюсом в центре круга) могут быть использованы в качестве опорных фигур. Все необходимые исходные данные для подбора аппроксимирующих функций  $\omega$  –  $K_f$  при выбранном геометрическом преобразовании мембран внесем в таблицу 2 и построим их (колонка 4), представляя эти функции в виде зависимости

$$\omega = B \sqrt{K_f^2 + C \alpha p / (Am)}.$$

Сопоставляя соответственные коэффициенты в аппроксимирующих функциях, приходим к выводу, что они монотонно изменяются в одном направлении. Поэтому для их определения для других значений углов  $\alpha$  можно также построить аппроксимирующие функции. С помощью программного комплекса *Table curve* получим:

$$K_w = \sqrt{\frac{3,026 + 0,122 \alpha^2 + 0,255 \alpha^4}{1 + 0,0427 \alpha^2 + 0,0413 \alpha^4}}; \quad C = \frac{67,394 - 31,85 \alpha + 6,51 \alpha^2}{1 - 0,592 \alpha + 0,231 \alpha^2},$$

где  $\alpha$  подставляется в радианах. В общем виде для любого угла  $\alpha$  основную частоту колебаний мембран рассматриваемых форм можно находить по формуле

$$\omega = \sqrt{\frac{3,026 + 0,122 \alpha^2 + 0,255 \alpha^4}{1 + 0,0427 \alpha^2 + 0,0413 \alpha^4}} \frac{p}{K_f} + \frac{67,394 - 31,85 \alpha + 6,51 \alpha^2}{1 - 0,587 \alpha + 0,147 \alpha^2} \frac{p}{\phi} \quad (14)$$

Таблица 2 – Основные частоты колебаний мембран в виде частей круга с двумя отсеченными симметрично расположеннымися сегментами  $W = K_w p/(Am)$

$\varphi^o (рад)^o$	$\omega_2$	$K_f$	Расчетные формулы	$K_f$	$\omega_m$
1	2	3	4	5	6
160 (2,7925)	22,242	8,4814	$W = 2,255\sqrt{K_f^2 + 25,336} p/(Am)$	6,2903	18,167
140 (2,4435)	21,555	8,2511	$W = 2,1725\sqrt{K_f^2 + 30,373} p/(Am)$	6,3407	18,247
120 (2,0944)	21,031	8,1137	$W = 2,068\sqrt{K_f^2 + 37,630} p/(Am)$	6,4769	18,448
100 (1,7453)	20,723	8,1038	$W = 1,952\sqrt{K_f^2 + 47,036} p/(Am)$	6,7453	18,777
80 (1,3963)	20,740	8,2986	$W = 1,849\sqrt{K_f^2 + 56,908} p/(Am)$	7,2232	19,311
60 (1,0472)	21,314	8,8855	$W = 1,789\sqrt{K_f^2 + 65,200} p/(Am)$	8,0936	20,318
40 (0,6981)	23,397	10,4349	$W = 1,771\sqrt{K_f^2 + 65,582} p/(Am)$	9,9215	22,681
20 (0,3491)	31,125	15,8098	$W = 1,740\sqrt{K_f^2 + 69,458} p/(Am)$	15,5630	30,701

Примечания:

1. В качестве первой опорной фигуры использовался круг, для которого  $\omega_1 = 18,156 p/(Am)$ ,  $K_{f1} = 2\pi$ .
2. Данные, представленные во второй колонке, подсчитаны по формуле (9).
3. В колонках 5 и 6 приведены значения коэффициента формы и основной частоты колебаний мембран в виде кругового сектора с вершиной, расположенной на дуге окружности, полученные с помощью построенных аппроксимирующих функций.

Несмотря на то, что формула (14) выглядит несколько громоздкой, она является универсальной. С ее помощью можно найти решения для всех возможных мембран, получаемых путем отсечения от круглой мембраны двух симметричных секторов, расположенных как угодно друг относительно друга. Известным точным решениям задачи об основной частоте колебаний мембран в виде круговых секторов эта формула удовлетворяется с высокой точностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонткевич, В.С. Собственные колебания пластиноок и оболочек [Текст] / В.С. Гонткевич. – Киев: Наукова думка, 1964. – 288 с.
2. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формой области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: Изд-во АСВ, 1999. – 302 с.
3. Коробко, В.И. Количественная оценка симметрии [Текст] / В.И. Коробко, А.В. Коробко. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 126 с.
4. Полиа, Г. Изопериметрические неравенства в математической физике [Текст] / Г. Полиа, Г. Сёге. – М.: Госматиздат, 1962. - 336 с.

### А.В. Коробко

Приокский государственный университет, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор,  
декан факультета новых технологий и автоматизации производства  
E-mail: [fntap@mail.ru](mailto:fntap@mail.ru)

### Н.Г. Калашникова

Приокский государственный университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент,  
зав. кафедрой «Георетическая механика и инженерная графика»  
E-mail: [sapr@ostu.ru](mailto:sapr@ostu.ru)

A. KOROBKO, N. KALASHNIKOVA

## BASIC FREQUENCIES OF VIBRATIONS OF SECTOR MEMBRANES WITH CURVILINEAR AREA DEFINED IN A CIRCLE ARC

*In the article the universal approximating function to determine basic frequencies of vibrations of sector membranes with curvilinear area defined in a circle arc is plotted by means of the interpolation technique by the form factor. For all sector membranes the round membrane and the membrane in the form of circular sector with the peak in the circle center are accepted as reference membranes. The relationships satisfy with high accuracy the known exact solutions of the problem about the basic oscillation frequency of the membranes in the form of circular sectors. These solutions can be used for calculation of the membranes of these forms directly or to obtain reference solutions of ITSF.*

**Key words:** sector membranes, basic frequencies of vibrations, interpolation method by the form coefficient, reference solutions, approximating functions.

### BIBLIOGRAPHY

1. Gontkevich, V.S. Sobstvennie kolebaniya plastinok i obolochek [Tekst] / V.S. Gontkevich. – Kiev: Naukova dumka, 1964. – 288 s.
2. Korobko, A.V. Geometricheskoe modelirovaniye formoi oblasti v dvumernih zadachah teorii uprugosti [Tekst] / A.V. Korobko. – M.: Izd-vo ASV, 1999. – 302 s.
3. Korobko, V.I. Kolichestvennaya ocenka simmetrii [Tekst] / V.I. Korobko, A.V. Korobko. – M.: Izd-vo ASV, 2008. – 126 s.
4. Polia, G. Izoperimetricheskie neravenstva v matematicheskoi fizike [Tekst] / G. Polia\_ G. Sege. – M.: Gosmatizdat, 1962. 336 s.

#### A. Korobko

Prioksky state university, Orel  
Doctor of technical sciences, professor,  
head of the New technologies and production automation faculty  
E-mail: [fntap@mail.ru](mailto:fntap@mail.ru)

#### N. Kalashnikova

Prioksky state university, Orel  
Candidate of technical sciences, associated professor,  
head of the Teoretical mechanics and engineering graphics department  
E-mail: [sapr@ostu.ru](mailto:sapr@ostu.ru)

ЛОКТИОНОВ А.П.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭРМИТОВОЙ АППРОКСИМАЦИИ НЕПОСРЕДСТВЕННО НЕ ИЗМЕРЯЕМОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА

*Цель исследования – на примере контроля конструкции консольной балки обосновать возможность определения непосредственно не измеряемой характеристики объекта с использованием интерпретации результатов наблюдений на основе редукции измерений и эрмитовых методов аппроксимации для численного дифференцирования. Практическое применение предложенных методов рассмотрено на примере повышения точности оценки жесткости при испытаниях нагружением конструкции консольной балки. Основу разработанных методов совершенствования аппроксимации непосредственно не измеряемой характеристики конструкции составляют предложенные критерии оценивания эффективности редукции измерений.*

**Ключевые слова:** измерительная система, функция, обратная задача, аппроксимация, полином, редукция измерений.

**Введение.** Известно, что в задаче определения деформативных характеристик элементов строительных конструкций эффективно применение методов аппроксимации, интерполяции [1, 2]. В работе автора [1] сообщалось, что в задаче экспериментально-расчетного определения характеристик механических конструкций эффективно использование теории и аппарата редукции измерений. Редукция измерений позволила определять опорный момент прямоосной упругоизгибающейся балки, нагруженной сосредоточенной силой, если не заданы начальные условия задачи поперечного изгиба балки. Определение опорного момента балки реализуется лагранжевой аппроксимацией второй производной функции прогиба при дискретизации прогибов в четырех отсчетных точках и численном дифференцировании измерительно-вычислительным комплексом [3].

В статье предлагается метод повышения точности экспериментально-расчетного определения внутренних силовых факторов. Метод основан на редукции измерений и эрмитовой аппроксимации для численного дифференцирования.

Под методами редукции измерений понимается формализм, позволяющий по результатам измерений в наблюдаемой системе «измеряемый объект – среда – информационно-измерительная система» получать наиболее точное описание ненаблюдаемой системы «исследуемый объект – среда». Характеристики измеряемого объекта в отличие от исследуемого искажены взаимодействием с информационно-измерительной системой (ИИС), в частности, с ее измерительным компонентом (ИК), включающим датчики и канал связи, а в некоторых случаях и со средой. Алгоритм, реализуемый ИИС, в частности, ее вычислительным компонентом (ВК), извлекает из выходного сигнала ИК максимально точные значения представляющих интерес целевых характеристик исследуемого объекта, не доступных для прямого изучения [4].

Особенности обратных задач численного дифференцирования и использования аппарата редукции измерений без утраты общности рассматриваем на примере контроля силового элемента (СЭ) механической конструкции – консольной балки длиной  $l$  с постоянной жесткостью на изгиб  $EI$ , нагруженной сосредоточенной силой на ее конце СЭ, в частности, прогибов и углов наклона упругой линии, контролируют целевые характеристики СЭ – внутренние силовые факторы.

Выделяем следующие системные элементы: измеряемый объект – СЭ; среда – внешняя нагрузка на СЭ, условия силоведения, условия закрепления СЭ; ИК; ВК; исследуемый объект – внутренние силовые факторы, действующие в СЭ. По результатам измерений в

наблюдаемой системе при интерпретации измерений косвенных проявлений исследуемого объекта, каковыми в данном случае являются измеряемые датчиками прогибы и углы наклона упругой линии СЭ, получаем наиболее точные значения искомых силовых факторов.

Цель данной работы – совершенствование методов полиномиальной аппроксимации непосредственно не измеряемых характеристик СЭ с использованием ИИС численного дифференцирования при эрмитовой аппроксимации. Должны быть достигнуты предельные оптимальные соотношения в преобразовательной агрегации ИК по классу преобразования, количеству и размещению датчиков на измеряемом объекте. Цель исследований состоит в разработке единого однотипного формализма редукции измерений и критериев оценивания эффективности решения задачи редукции измерений при использовании в ИИС численного дифференцирования. Прикладное значение исследований заключается в повышении точности определения характеристик СЭ.

**Проблема редукции измерений при эрмитовой аппроксимации численного дифференцирования.** Повышение эффективности редукции измерений связано с оптимизацией преобразовательной агрегации ИК. Используем в ИК два класса преобразования датчиков и сигналов ИК (отсчетов прогибов  $y^*(x_i)$  и углов наклона упругой линии СЭ  $y^*(x_i)$ ) [5]. При  $p$ -преобразовании отсчетов сигналов канала связи линейная функция преобразования проходит через начало координат, выполняется равномерная непрерывная норма абсолютной величины неопределенности измерений датчиками и каналом связи соотношениями

$$\begin{aligned} \|Dy(x_i)\| &= D_m(y(x_i)) = e_p y_p^{-3} D(y(x_i)) = |y^*(x_i) - y(x_i)|, \\ \|Dy(x_i)\| &= D_m(y(x_i)) = e_p y_p^{-3} D(y(x_i)) = |y^*(x_i) - y(x_i)|, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $D_m(y(x_i))$  и  $D_m(y(x_i))$  – верхние границы абсолютных значений неопределенности измерений отсчетов;

$y_p$  и  $y_p^*$  – пределы измерений, равные верхним границам  $\sup|y^*(x_i)|$  и  $\sup|y^*(x_i)|$  на компактных наборах вещественных чисел  $\{y^*(x_1), \dots, y^*(x_n)\}$  и  $\{y^*(x_1), \dots, y^*(x_n)\}$ ;

$e_p$  – приведенная неопределенность измерений;

$n$  – количество датчиков.

При  $p$ -преобразования отсчетов в отличие от  $p$ -преобразования вместо соотношений (1) выполняются соотношения

$$D_m(y(x_i)) = e_p y_{pi}^{-3} D(y(x_i)), \quad D_m(y(x_i)) = e_p y_{pi}^{-3} D(y(x_i)), \quad (2)$$

где  $y_{pi} = |y(x_i)|$  и  $y_{pi}^* = |y^*(x_i)|$  – пределы измерений.

Функции отсчетов  $y^*(x)$  и  $y^*(x)$  есть общие решения линейного дифференциального уравнения [6, 7]. Рассматриваем класс обратных задач восстановления целевых характеристик СЭ, представляемой функцией

$$f(x) = y^{(r)}(x), \quad x \in I \quad (3)$$

где  $y(x)$  – решение начальной задачи с дифференциальным уравнением  $D^m y = f_\delta(x)$ ;

$I = [0, l]$  – отрезок задания решения при физических ограничениях на сетку аппроксимации, например, по [8] вида

$$0,05 l = x_a \leq x_i \leq x_b = 0,95 l; \quad (4)$$

$D^m$  – стационарный дифференциальный оператор  $m$ -го порядка;

$f_\delta(x)$  – внешняя нагрузка.

Вместе с функцией  $f(x)$  в отсчеты  $y^*(x_i)$  и  $y^*(x_i)$  канала связи ИК преобразуется и совокупность других аргументов, характеризующих влияющие величины, в том числе относящиеся к внешней среде. Редукция измерений в ИИС включает приближение к искомой функции  $f(x)$  – получение приближенной функции  $f^*(x)$  решением обратной задачи,, обеспече-

чивающей минимальное значение уровня неопределенности определения непосредственно не измеряемой целевой характеристики объекта.

Множество значений  $\{y^*, y^{\phi^*}\}$  образует пространство наблюдений – конечномерное координатное евклидово пространство измеренных отсчетов на сетке (4), что позволяет вычислять значение функции (3) с использованием эрмитовой аппроксимации двукратными узлами ( $DxH$ -аппроксимации) [9]

$$D^r(y) \approx S_n(y, y^{\phi}) = \sum_{i=1}^n [H_i y^*(x_i) + C_i y^{\phi^*}(x_i)] \quad r \in \{1, 2, \dots, 2n-1\} \quad H_i, C_i \in R, \quad (5)$$

частичной эрмитовой аппроксимации ( $DxpH$ -аппроксимации)

$$D^r(y) \approx S_n(y^{\phi}) = \sum_{i=1}^n C_i y^{\phi^*}(x_i) \quad r \in \{1, 2, \dots, n\} \quad H_i, C_i \in R, \quad (6)$$

где  $H_i$  и  $C_i$  – эрмитовы коэффициенты;  $R$  – множество действительных чисел.

Прохождение аппроксимационного полинома через экспериментальные значения функции в узлах сетки аппроксимации (в точках размещения датчиков) в ряде случаев нецелесообразно. С учетом неопределенности измерения значений, например, функции  $y(x)$  аппроксимационный полином повторяет эту неопределенность. Однако возможен выбор такого полинома, график которого проходит близко от данных точек. Понятие близости уточняется видом приближения. Выбор метрики, как правило, определяется характером эксперимента. Среднеквадратичное приближение вполне приемлемо при обработке экспериментальных результатов, оно сглаживает некоторые неточности функции  $y(x)$ , учитывает неопределенность измерения в узловых точках [10]. Эффективность среднеквадратичного приближения снижается при малой величине массива обрабатываемых экспериментальных результатов. В данной работе в задаче приближения ставим более жесткое условие – равномерную непрерывную норму абсолютной неопределенности измерения.

**Критерии оценивания эффективности редукции измерений.** Рассмотрим процедуру использования редукции измерений при полиномиальных методах аппроксимации для численного дифференцирования (5), (6) в терминах и обозначениях предлагаемой методики. В качестве критериев оценивания эффективности решения задачи редукции измерений используем абсолютное  $\nu_D$  и относительное  $\nu_d$  число обусловленности задачи редукции по соотношениям

$$D_m(f) \leq \nu_D \sup D_m(y, y^{\phi}), \quad (7)$$

$$d_m(f) \leq \nu_d \epsilon_p, \quad (8)$$

где  $D_m(f)$ ,  $d_m(f)$ ,  $D_m(y, y^{\phi})$  и  $d_m(y, y^{\phi})$  – соответственно верхние границы абсолютных и относительных значений неопределенности решения и измерений отсчетов.

Предельные оптимальные соотношения в преобразовательной агрегации ИК по классу преобразования, количеству и размещению датчиков на контролируемом СЭ достигаются регуляризацией агрегации с получением минимального числа обусловленности задачи редукции измерений. Регуляризация состоит в выборе класса преобразования сигналов и вида распределения узлов сетки аппроксимации. При  $p$ -преобразовании отсчетов  $y^*(x_i)$  и  $y^{\phi^*}(x_i)$  задача регуляризации сводится к задаче регуляризации компакта узлов сетки в константах Лебега-Эрмита второго рода  $L_{H2}$  и  $L_{C2}$  [11]:

$$L_{H2} = \min_{j=1}^n \sum_{i=1}^n |H_j(x_i)|, \quad L_{C2} = \min_{j=1}^n \sum_{i=1}^n |C_j(x_i)|. \quad (9)$$

Константы (9) используются в качестве критериев оптимального управления распределением узлов сетки аппроксимации.

Единой стратегии выбора оптимальных узлов сетки, гарантирующей сходимость процесса получения минимального числа обусловленности задачи редукции измерений для всех

непрерывных на отрезке  $[x_a, x_b]$  функций, нет. Получены отдельные частные результаты [12]. При равномерной норме аппроксимации алгебраическими полиномами для приближения функции (3), равенстве степени  $m$  аппроксимационного полинома и степени функции  $y(x)$ , при соотношениях (1) оптимальные узлы аппроксимационной формулы для получения минимального абсолютного числа неопределенности решения задачи редукции – точки чебышевского альтернанса порядка  $m + 1$  [7]. Полином Чебышева степени  $m$  на отрезке  $[x_a, x_b]$  имеет чебышевский альтернанс порядка  $m + 1$  – набор  $m + 1$  точек, в которых полином принимает максимальное по модулю значение с последовательным чередованием знаков. В частности, для  $m = 1$  точки альтернанса  $x_1 = x_a, x_2 = x_b$ . Для  $m = 2$  точки альтернанса  $x_1 = x_a, x_2 = (x_a + x_b)/2, x_3 = x_b$  [7].

Особенности обратных задач численного дифференцирования и процедуры использования редукции измерений без утраты общности рассматриваем на примере функции  $y(x)$  третьей степени при частных решениях уравнения (3)

$$y(x_i) = x_0 + x_1 x_i + x_2 \frac{x_i^2}{2} + x_3 \frac{x_i^3}{6}, \quad y'(x_i) = x_1 + x_2 x_i + x_3 \frac{x_i^2}{2} \quad \text{при } x_2 = -l x_3, \quad (10)$$

где  $x_0, x_1, x_2, x_3$  – начальные параметры функции  $y(x)$  в обратной начальной задаче нахождения искомой функции  $f(x) = y^{(r)}(x) = x$ , в задаче Коши;

$$x_2 = \frac{M_0}{EI}; \quad x_3 = \frac{Q}{EI}.$$

Уравнения (10) соответствуют элементарной теории прямого поперечного изгиба стержней, характеризуемой пропорциональностью кривизны нейтральной оси СЭ в каждой ее точке изгибающему моменту, принятием гипотезы плоских сечений. Результаты, полученные в статье, отвечают и приближенной теории изгиба стержней с учетом влияния деформаций сдвига на его прогиб: [13]

$$y(x) = x_0 + x_1 x - g x + x_2 \frac{x^2}{2} + \frac{x_3 x^3}{6}, \quad g = k \frac{Q}{GF},$$

где  $g$  – угол сдвига;

$k$  – коэффициент сдвига;

$G$  – модуль сдвига материала;

$F$  – площадь поперечного сечения.

Используемая модель (3) представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка с внешней нагрузкой

$$f_\delta(x) = -x_3(l - x).$$

Рассматриваем технические задачи, когда выполняются соотношения (4) и

$$|x_0 + x_1 x_i| \ll |y(x_i)|, \quad |x_1| \ll |y'(x_i)|. \quad (11)$$

По условиям (4), (10) и (11) получены приближенные равенства

$$x_2 \approx 2l \frac{y(x_i)}{x_i^2(l - x_i/3)}, \quad x_2 \approx l \frac{y'(x_i)}{x_i(l - x_i/2)}, \quad x_3 \approx -2 \frac{y(x_i)}{x_i^2(l - x_i/3)}, \quad x_3 \approx - \frac{y'(x_i)}{x_i(l - x_i/2)}. \quad (12)$$

**Частичная эрмитова  $DxpH$ -аппроксимация.** Аппроксимационный полином вида (6) при  $DxpH$ -аппроксимации

$$x_2 = \sum_{i=1}^3 C_i y^*(x_i) \quad (13)$$

реализует формулу производной (3) с  $r = 2$  при численном дифференцировании в ВК измеряемой функции  $y(x)$  при эрмитовых коэффициентах

$$(14) \quad C_1 = -\frac{x_2 + x_3}{(x_2 - x_1)(x_3 - x_1)}, \quad C_2 = \frac{x_1 + x_3}{(x_3 - x_2)(x_2 - x_1)}, \quad C_3 = -\frac{x_2 + x_1}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)}.$$

Абсолютное значение неопределенности определения  $x_2$ , через которое вычисляется опорный изгибающий момент  $M_0$  в СЭ, по формуле (13) по совокупности трех отсчетов равно

$$Dx_2 = \sum_{i=1}^3 |C_i D y(x_i)|. \quad (15)$$

Относительное значение неопределенности определения  $x_2$  равно

$$dx_2 = Dx_2 / |x_2|. \quad (16)$$

При  $p$ -преобразовании отсчетов в  $DxpH$ -аппроксимации (13) с учетом соотношений (1), (7), (15) и (12) получена верхняя граница абсолютного значения неопределенности искомой функции

$$D_m(x_2) = e_p \sum_{i=1}^3 |C_i y(x_3)|$$

и абсолютное число обусловленности задачи редукции

$$v_D = \sum_{i=1}^3 |C_i|. \quad (17)$$

Следовательно, при коэффициентах (14)

$$v_D = \frac{2}{(x_3 - x_2)(x_2 - x_1)}, \quad (18)$$

минимальное абсолютное число обусловленности задачи:

$$(v_D)_{\min} = L_{c2}. \quad (19)$$

Результат регуляризации распределения узлов аппроксимации – точки чебышевского альтернанса третьего порядка

$$x_1 = x_a, x_2 = (x_a + x_b)/2, x_3 = x_b. \quad (20)$$

На сетке (20) минимальное абсолютное число обусловленности задачи  $(v_D)_{\min} = 9,88/l$ . Без регуляризации абсолютное число обусловленности задачи (18) в сравнении с минимальным возрастает, в частности по рисунку 1 в 2,5 раза при  $x_2 = 0,15l$ .

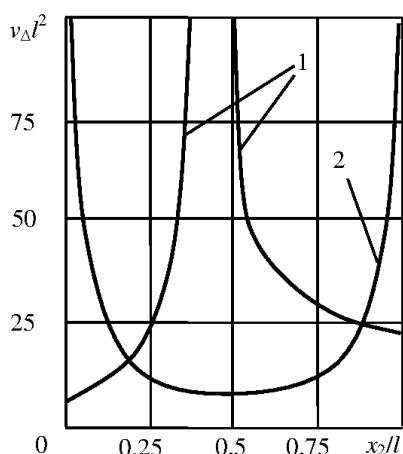


Рисунок 2 – Влияние координаты второго отсчета на число обусловленности: 1 – по уравнению (33); 2 – по уравнению (18)

Следующим этапом является нахождение относительного числа обусловленности задачи. С учетом соотношений (1), (8), (12) и (16) получаем относительное число обусловленности задачи редукции

$$v_d = x_3(l - x_3/2) \sum_{i=1}^3 |C_i|, \quad (21)$$

принимающее при распределении узлов сетки (20) наименьшее значение  $(v_d)_{\min} = 4,93$ .

При  $p$ -преобразовании отсчетов в  $DxpH$ -аппроксимации (13) с учетом соотношений (2), (7) и (15) получаем абсолютное число обусловленности задачи редукции

$$v_D = \frac{1}{x_3(l - x_3/2)} \sum_{i=1}^2 |C_i x_i (l - x_i/2)|. \quad (22)$$

Подстановкой в формулу (22) коэффициентов (14) и регуляризацией распределения узлов аппроксимации получено распределение узлов

$$x_1 = 0,050l, x_2 = 0,264l, x_3 = 0,950l, \quad (23)$$

и минимальное абсолютное число обусловленности задачи  $(n_D)_{\min} = 4,25/l$ .

Оценим регуляризацию измерительной агрегации датчиков при  $pi$ -преобразовании отсчетов по относительному числу обусловленности задачи редукции. С учетом соотношений (2), (8), (12) и (16) получаем относительное число обусловленности задачи редукции

$$v_D = \sum_{i=1}^3 |C_i x_i (l - x_i/2)|. \quad (24)$$

Подстановкой в формулу (24) коэффициентов (14) и регуляризацией распределения узлов аппроксимации получено распределение узлов (23), минимальное относительное число обусловленности задачи  $(n_D)_{\min} = 2,12$ .

Полученные результаты аппроксимации (6) при  $pi$ -преобразовании отсчетов лучше результатов при  $p$ -преобразовании в 2,3 раза.

**Эрмитова  $DxH$ -аппроксимация с кратными узлами.** Аппроксимационный полином вида (6) при  $DxpH$ -аппроксимации

$$x_3 = \sum_{i=1}^3 C_i y_i^*(x_i), \quad (25)$$

реализует формулу производной (3) с  $r = 3$  при численном дифференцировании в ВК измеряемой функции  $y(x)$  при эрмитовых коэффициентах

$$C_1 = \frac{2}{(x_2 - x_1)(x_3 - x_1)}, \quad C_2 = -\frac{2}{(x_3 - x_2)(x_2 - x_1)}, \quad C_3 = \frac{2}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)}. \quad (26)$$

Абсолютное значение неопределенности определения  $x_3$ , через которое вычисляется поперечная сила  $Q$  в СЭ, по формуле (25) по совокупности трех отсчетов равно

$$Dx_3 = \sum_{i=1}^3 |C_i D y_i(x_i)|. \quad (27)$$

Относительное значение неопределенности определения  $x_3$  равно

$$d x_3 = D x_3 / |x_3|. \quad (28)$$

При  $p$ -преобразовании отсчетов в  $DxpH$ -аппроксимации (25) с учетом соотношений (1), (7), (27) и (12) получены формулы верхней границы абсолютного значения неопределенности искомой функции

$$D_m(x_3) = e_p \sum_{i=1}^3 |C_i y_i(x_3)|,$$

абсолютного числа обусловленности задачи редукции вида (17) и минимального абсолютного числа обусловленности задачи вида (19).

Результат регуляризации - распределения узлов аппроксимации (20). На сетке (20) минимальное абсолютное число обусловленности задачи  $(v_D)_{\min} = 19,8/l^2$ .

С учетом соотношений (1), (8), (28) и (12) при  $x_3$  – третьем узле сетки получаем относительное число обусловленности задачи редукции вида (21), принимающее при распределении узлов сетки (20) наименьшее значение  $(n_D)_{\min} = 9,85$ .

При  $pi$ -преобразовании отсчетов в  $DxpH$ -аппроксимации (25) с учетом соотношений (2), (7), (12) и (27) получено абсолютное число обусловленности задачи редукции вида (22).

Подстановкой в формулу (22) коэффициентов (26) и регуляризацией распределения узлов аппроксимации получено распределение узлов

$$x_1 = 0,050l, x_2 = 0,213l, x_3 = 0,950l \quad (29)$$

и минимальное абсолютное число обусловленности задачи  $(n_D)_{\min} = 9,62/l^2$ .

При оценке регуляризации измерительной агрегации при  $ri$ -преобразовании отсчетов по относительному числу обусловленности задачи редукции с учетом соотношений (12), (2), (8) и (28) получено относительное число обусловленности задачи редукции вида (24).

Подстановкой в формулу (24) коэффициентов (26) и регуляризацией распределения узлов аппроксимации получено распределение узлов (29), минимальное относительное число обусловленности задачи  $(n_D)_{\min} = 4,80$ . Полученные результаты при  $ri$ -преобразовании отсчетов лучше результатов при  $p$ -преобразовании в 2 раза.

Анализируем трехточечную трехдатчиковую измерительную агрегацию при  $DxH$ -аппроксимации (5) с потенциально двукратными узлами, когда одна часть узлов однократные, а часть двукратные,

$$x_2 = \sum_{i=1}^3 \left( H_i y^*(x_i) + C_i y \phi^*(x_i) \right), \quad (30)$$

реализующем уравнение (3) с  $r = 2$  при частных решениях (11) с эрмитовыми коэффициентами

$$H_1 = -\frac{2}{(x_3 - x_1) \dot{x}_3 + x_1 - 2x_2 - \frac{1}{3l} (x_3^2 - 3x_2^2 + x_3 x_1 + x_1^2)}, \quad (31)$$

$$H_2 = 0, H_3 = -H_1, C_1 = 0, C_2 = (x_3 - x_1)H_1, C_3 = 0.$$

Абсолютное значение неопределенности определения  $x_2$  по формуле (30) по совокупности двух отсчетов  $y^*(x_1)$ ,  $y^*(x_3)$  и одного отсчета  $y^*(x_2)$  равно

$$D(x_2) = \sum_{i=1}^3 \left| H_i \right| + \left| C_i \right| \quad (32)$$

Относительное значение неопределенности определения  $x_2$  - формула вида (16).

С учетом соотношений (1), (7), (12) и (32) для  $p$ -преобразования отсчетов получена верхняя граница абсолютного значения неопределенности искомой функции

$$D_m(x_2) = e_p y(x_3) \left| H_1 \right| + \left| H_3 \right| + 2 \left| C_2 \frac{x_2(l - x_2/2)}{x_3^2(l - x_3/3)} \right|,$$

и абсолютное число обусловленности задачи редукции

$$v_D = \left| H_1 \right| + \left| H_3 \right| + 2 \left| C_2 \frac{x_2(l - x_2/2)}{x_3^2(l - x_3/3)} \right|, \quad (33)$$

Минимизацией числа обусловленности (33) с учетом константы  $L_{H2}$  (9) при коэффициентах (31) при  $DxH$ -аппроксимации (30) получено минимальное число обусловленности задачи редукции  $(v_D)_{\min} = 8,14/l^2$  в преобразованном из трехточечного в двухточечное распределение узлов аппроксимации

$$x_1 = x_2 = x_a, x_3 = x_b. \quad (34)$$

Без регуляризации абсолютное число обусловленности трехточечной задачи (33) в сравнении с минимальным возрастает, в частности, по рисунку 1 в 4 раза при  $x_2 = 0,3l$ .

Рассмотренная двухточечная агрегация, но с измерительным участком при  $a = 0, b = l$ , использована в [14, с. 15, п. 8.11], где при проверке жесткости изгибаемых изделий, работающих как консоль, предложено использовать двухточечную схему с измерением прогиба

свободного конца консоли, а также осадки и поворота опоры. У такой преобразовательной агрегации минимальное абсолютное число обусловленности задачи редукции  $(v_D)_{\min} = 6,00/l^2$ . Отметим, что распределение узлов в агрегации [14] не учитывает принцип Сен-Венана в отличие от (4). По [6, 8, 15] следует размещать датчики вне зон силоведения и опирания балки.

С использованием числа обусловленности задачи (33) и учетом соотношений (1), (8), (12) и (16) получено относительное число обусловленности задачи редукции

$$v_D = \frac{x_3^2}{2l} \frac{\alpha}{\epsilon} - \frac{x_3 \ddot{\alpha}}{3} \frac{\alpha}{\epsilon} v_D,$$

принимающее при распределении узлов сетки (34) наименьшее значение  $(v_D)_{\min} = 2,51$ .

При  $pi$ -преобразовании отсчетов с учетом соотношений (2), (7), (12) и (32) получены верхняя граница абсолютного значения неопределенности функции  $f(x)$

$$D_m(x_2) = e_p \sum_{i=1}^3 \left| H_i y(x_i) \right| + \left| C_i y(x_i) \right| \frac{\ddot{\alpha}}{\epsilon}$$

и абсолютное число обусловленности задачи редукции

$$v_D = \frac{1}{(l - x_3/3)x_2^2} \sum_{i=0}^3 \left| H_i x_i^2 (l - x_i/3) \right| + 2 \left| C_i x_i (l - x_i/2) \right| \frac{\ddot{\alpha}}{\epsilon}, \quad (35)$$

принимающее наименьшее значение при распределении отсчетов (34). Результат регуляризации задачи минимизированием функции (35) – минимальное абсолютное число обусловленности задачи  $(n_D)_{\min} = 4,35/l^2$ .

С учетом соотношений (2), (8), (12) и (16) получено относительное число обусловленности задачи редукции

$$v_D = \sum_{i=0}^3 \left| H_i x_i^2 (l - x_i/3) \right| / 2 + \left| C_i x_i (l - x_i/2) \right| \frac{\ddot{\alpha}}{\epsilon}. \quad (36)$$

Результат подстановки в формулу (36) коэффициентов (31) и регуляризации – распределение узлов аппроксимации (34), минимальное относительное число обусловленности задачи редукции  $(n_D)_{\min} = 1,34$ . Полученные результаты при  $pi$ -преобразовании отсчетов лучше результатов при  $p$ -преобразовании в 1,9 раз.

**Заключение.** Результаты сопоставительного анализа измерительных агрегаций, лагранжевой  $L$ -аппроксимации по [7] и эрмитовых аппроксимаций приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение аппроксимаций для начального параметра  $x_2$

Вид преобразования отсчетов	Минимальное число обусловленности задачи редукции			
	Вид числа обусловленности задачи	Вид аппроксимации		
$p$ -преобразование	Четырехточечная $L$ -аппроксимация	Двухточечная $DxpH$ -аппроксимация	Трехточечная $DxpH$ -аппроксимация	
	$(v_D)_{\min}$	$132/l^2$	$8,14/l^2$	$9,88/l^2$
$pi$ -преобразование	$(v_D)_{\min}$	40,6	2,51	4,93
	$(v_D)_{\min}$	$14,9/l^2$	$4,35/l^2$	$4,25/l^2$
	$(v_D)_{\min}$	4,60	1,34	2,12

Как видно из таблицы 1 предлагаемая методика в зависимости от требуемого уровня неопределенности определения искомой функции при известных ограничениях на уровень экспериментальной базы позволяет принимать решение о выборе вида аппроксимации, а

также об использовании сравнительно простых измерительных агрегаций с классом  $p$ -преобразования отсчетов или для понижения значения минимального числа обусловленности задачи использовать более сложную в реализации агрегацию с  $pi$ -преобразованием отсчетов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Локтионов, А.П. Принцип построения системы управления исследованиями и испытаниями механических конструкций на основе редукции преобразований [Текст] / А.П. Локтионов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 6. – С. 57–61.
2. Коробко, А.В. Способы решения задач поперечного изгиба трапециевидных пластинок [Текст] / А.В. Коробко, М.А. Фетисова // Строительство и реконструкция. – 2010. – №1 (27). – С. 36-39.
3. Локтионов, А.П. Экспериментально-расчетный метод определения опорного момента консольной балки [Текст] / А.П. Локтионов // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 2. – С. 15–19.
4. Локтионов, А.П. Принцип построения системы измерения взлетного веса и положения центра тяжести ЛА на основе редукции измерений [Текст] / А.П. Локтионов // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2007. – № 2. – С. 44-47.
5. Локтионов, А.П. Регуляризация решетчатой временной функции сигнала канала связи [Текст] / А.П. Локтионов // Телекоммуникации. – 2010. – № 8. – С. 2–7.
6. Локтионов, А.П. Полиномиальная аппроксимация в экспериментально-расчетном методе оценки состояния конструктивного элемента [Текст] / А.П. Локтионов // Известия вузов. Строительство. – 2011. – № 11. – С. 93–100.
7. Локтионов, А.П. Структурная регуляризация подсистемы преобразовательного компонента преобразовательно-вычислительных систем [Текст] / А.П. Локтионов. – Курск : Курск. гос. техн. ун-т, 2009. – 323 с.
8. Локтионов, А.П. Модель исследования внутренних силовых факторов в элементах конструкций по прогибам [Текст] / А.П. Локтионов // Известия вузов. Строительство. – 2006. – № 7. – С. 93–98.
9. Локтионов, А.П. Концепция модели исследования внутренних силовых факторов в элементах конструкций измерительными ячейками [Текст] / А.П. Локтионов // Известия вузов. Строительство. – 2005. – № 6. – С. 88–93.
10. Турчак, Л.И. Основы численных методов [Текст] / Л.И. Турчак, П.В. Плотников. – М.: Физматлит, 2005. – 304 с.
11. Локтионов, А.П. Об эффективности эрмитовой аппроксимации в обратной начальной задаче при применении в информационно-вычислительной сети [Текст] / А.П. Локтионов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2013. – № 5 (50). – С. 34–40.
12. Бабенко, К.И. Основы численного анализа [Текст] / К.И. Бабенко. – М.-Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 848 с.
13. Локтионов, А.П. Определение внутренних силовых факторов при поперечном изгибе трубчатого элемента экспериментально-расчетным методом [Текст] / А.П. Локтионов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2015. – №6. – С. 10 – 16.
14. ГОСТ 8829-94. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости. – М. : Госстрой России, ГУП ЦПП, 1997. – 33 с.
15. Землянский, А.А. Обследование и испытание зданий и сооружений [Текст] / А.А. Землянский. – М.: Изд-во АСВ, 2002.– 240 с.

#### А.П. Локтионов

Юго-Западный государственный университет, г. Курск  
Доктор технических наук, профессор кафедры ЭС  
E-mail: [loapa@mail.ru](mailto:loapa@mail.ru)

---

A. LOKTIONOV

### IMPROVING HERMITE APPROXIMATION NOT DIRECTLY MEASURED CHARACTERISTICS OF THE STRUCTURE

*The possibility of determining not directly measurable characteristics of the structure, which is controlled by the measurement system using the interpretation of the results of observations on the basis*

*of the reduction of the measurement methods and hermite approximation for numerical differentiation. The basis of the perfection methods of Hermite approximation not directly measurable object characteristics make the proposed criteria evaluating the efficiency of reduction of measurements. Practical application of the proposed methods considered by the example of improving the accuracy of estimation of the stiffness of a cantilever beam under loading.*

**Keywords:** measuring system, function, inverse problem, approximation, polynomial, reduction.

### BIBLIOGRAPHY

1. Laktionov, A.P. Printsip postroyeniya sistemy upravleniya issledovaniyami i ispytaniyami mekhanicheskikh konstruktsiy na osnove reduktsii preobrazovaniy [Tekst] / A.P. Laktionov // Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika. – 2010. – № 6. – S. 57–61.
2. Korobko, A.V. Sposoby resheniya zadach poperechnogo izgiba trapetsiyevidnykh plastinok [Tekst] / A.V. Korobko, M.A. Fetisova // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2010. – №1 (27). – S. 36–39.
3. Laktionov, A.P. Eksperimental'no-raschetnyy metod opredeleniya opornogo momenta konsol'noy balki [Tekst] / A.P. Laktionov // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. – 2014. – № 2. – S. 15–19.
4. Laktionov, A.P. Printsip postroyeniya sistemy izmereniya vzletnogo vesa i polozheniya tsentra tyazhesti LA na osnove reduktsii izmereniy [Tekst] / A.P. Laktionov // Izv. vuzov. Aviatsionnaya tekhnika. – 2007. – № 2. – S. 44–47.
5. Laktionov, A.P. Regulyarizatsiya reshetchatoy vremennoy funktsii signala kanala svyazi [Tekst] / A.P. Laktionov // Telekommunikatsii. – 2010. – № 8. – S. 2–7.
6. Laktionov, A.P. Polinomial'naya approksimatsiya v eksperimental'no-raschetnom metode otsenki sostoyaniya konstruktivnogo elementa [Tekst] / A.P. Laktionov // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. – 2011. – № 11. – S. 93–100.
7. Laktionov, A.P. Strukturnaya regulyarizatsiya podsistemy preobrazovatel'nogo komponenta preobrazovatel'no-vychislitel'nykh sistem [Tekst] / A.P. Laktionov. – Kursk : Kursk. gos. tekhn. un-t, 2009. – 323 s.
8. Laktionov, A.P. Model' issledovaniya vnutrennikh silovykh faktorov v elementakh konstruktsiy po progibam [Tekst] / A.P. Laktionov // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. – 2006. – № 7. – S. 93–98.
9. Laktionov, A.P. Kontseptsiya modeli issledovaniya vnutrennikh silovykh faktorov v elementakh konstruktsiy izmeritel'nymi yacheykami [Tekst] / A.P. Laktionov // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. – 2005. – № 6. – S. 88–93.
10. Turchak, L.I. Osnovy chislennykh metodov [Tekst] / L.I. Turchak, P.V. Plotnikov. – M.: Fizmatlit, 2005. – 304 s.
11. Laktionov, A.P. Ob effektivnosti ermitovoy approksimatsii v obratnoy nachal'noy zadache pri primenenii v informatsionno-vychislitel'noy seti [Tekst] / A.P. Laktionov // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosu-darstvennogo universiteta. – 2013. – № 5 (50). – S. 34–40.
12. Babenko, K.I. Osnovy chislennogo analiza [Tekst] / K.I. Babenko. – M.-Izhevsk : NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2002. – 848 s.
13. Laktionov, A.P. Opredeleniye vnutrennikh silovykh faktorov pri poperechnom izgibe trubchatogo elementa eksperimental'no-raschetnym metodom [Tekst] / A.P. Laktionov // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. – 2015. – №6. – S. 10 – 16.
14. GOST 8829-94. Izdeliya stroitel'nyye zhelezobetonnyye i betonnyye zavodskogo izgotovleniya. Metody ispytaniy na gruzheniyem. Pravila otsenki prochnosti, zhestkosti i treshchinostoykosti. – M. : Gosstroy Rossii, GUP TSPP, 1997. – 33 s.
15. Zemlyanskiy, A.A. Obsledovaniye i ispytaniye zdaniy i sooruzheniy [Tekst] / A.A. Zemlyanskiy. – M. : Izd-vo ASV, 2002. – 240 s.

#### A. Laktionov

South-West state university, Kursk

Doctor of technical sciences, professor of the Electricity department

E-mail: [loapa@mail.ru](mailto:loapa@mail.ru)

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА STARK ES В ЦНИИСК ИМ. В.А. КУЧЕРЕНКО

*В статье рассмотрена проблема выбора адекватной расчетной схемы и методики расчета сооружений. Предложены некоторые пути развития методики расчета конструкций зданий и сооружений на сейсмические воздействия. Приведены примеры применения предложенных подходов в российском программном комплексе STARK ES. В программном комплексе STARK ES предусмотрен специальный «сейсмический» режим модального анализа, при котором автоматически определяется достаточное количество форм собственных колебаний, отбираются из них наиболее значимые, а также учитывается влияние высших ненайденных собственных форм колебаний.*

**Ключевые слова:** МКЭ, программный комплекс, расчетная схема, сейсмические воздействия

В настоящее время в Российской Федерации, несмотря на некоторый спад, связанный с известными экономическими причинами, проектируется и возводится большое количество современных зданий и сооружений. Основные требования, предъявляемые органами федеральной и региональной экспертизы проектной документации, обусловлены отечественным и зарубежным опытом расчета и конструирования зданий и сооружений, и большинство из них содержится в Федеральном Законе №384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». К таким требованиям, предъявляемым к расчетным обоснованиям проектов, относятся:

- применение пространственных расчетных моделей конструкций;
- учет геометрической, конструктивной и физической нелинейностей работы конструкций;
- учет истории возведения (монтажа) и нагружения конструкций;
- учет в расчетах совместной работы несущих конструкций, фундамента и основания;
- расчет на возможное прогрессирующее разрушение;
- использование разных расчетных схем для анализа различных состояний конструкции (в т.ч. аварийное предельное состояние);
- применение обоснованных и апробированных на практике методик расчета;
- выполнение параллельных расчетов с использованием альтернативных независимо разработанных расчетных средств.

Очевидно, что выполнение данных требований можно обеспечить только с помощью современных систем компьютерного моделирования.

В рамках проводимой Правительством Российской Федерации политики импортозамещения, особенную важность приобретает применение отечественных программных средств. К такому программному обеспечению можно отнести программный комплекс (далее ПК) STARK ES 2016 (разработчик – ООО «ЕВРОСОФТ», Москва). За последние годы ПК STARK ES получил серьезное развитие [1-6] и позволяет эффективно решать проблемы, возникающие у инженеров-проектировщиков и расчетчиков современных строительных конструкций.

ПК STARK ES широко применяется в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко для выполнения расчета ряда строительных сооружений повышенного уровня ответственности [7] с учетом вышеперечисленных требований. Так, в рамках работы по завершению строительства Богучанской ГЭС на реке Ангаре в Лаборатории автоматизации исследований и проектирования сооружений института был выполнен поверочный расчет четырех секций плотины ГЭС, пре-

терпевших изменения по сравнению с проектом, утвержденным в 1979 году. Расчетная модель одной из секций плотины показана на рисунке 1, а. Проектировщиками плотины в институте «Гидропроект» им. С.Я. Жука был использован ПК Ansys (рисунок 1, б).

В результате расчета подтверждены требуемые прочность, устойчивость и сейсмостойкость сооружения. Произведено сравнение результатов расчета плотины на сейсмические воздействия по основным параметрам напряженно-деформированного состояния (далее НДС) конструкций с результатами, полученными для основного сочетания нагрузок и при температурном воздействии с максимальной амплитудой колебаний среднемесячных температур воздуха. Даны оценка влияния нелинейной работы контакта плотины с основанием на ее статическое и динамическое НДС.

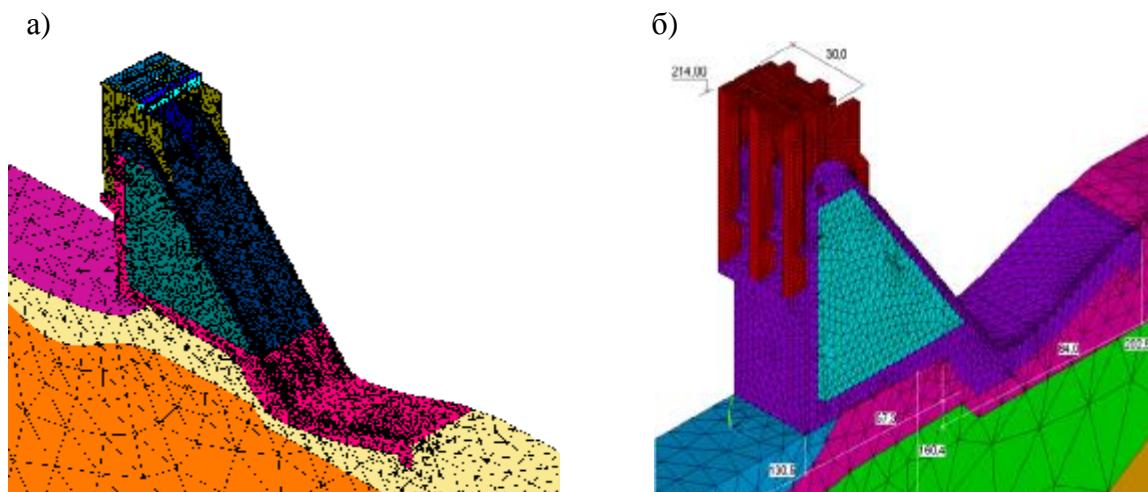


Рисунок 1 – Расчетные модели секций №21-22 плотины Богучанской ГЭС:  
а – в ПК STARK ES; б – в ПК Ansys.

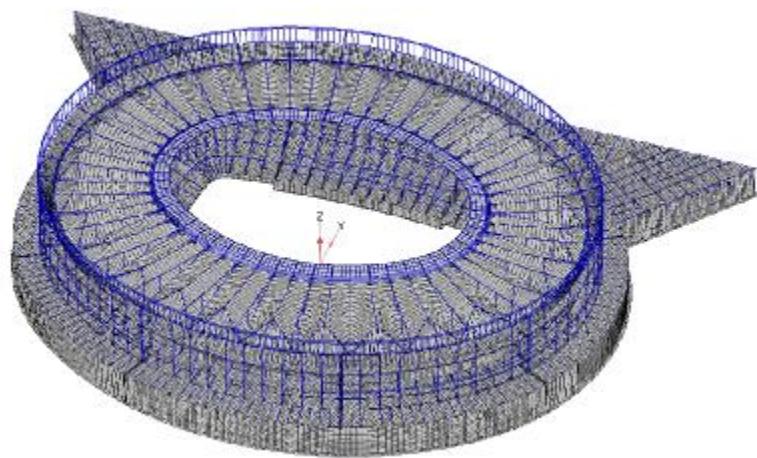


Рисунок 2 – Общий вид единой расчетной модели конструкций стадиона «Краснодар» в ПК STARK ES

В ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко были разработаны специальные технические условия (далее СТУ) на проектирование, дана экспертная оценка проекту стадии «П» на строительство нового стадиона «Краснодар», а также проведены расчеты на стадии «РД» с учетом изменений в проекте и актуализированных СТУ. На рисунке 2 представлен общий вид единой расчетной модели несущих конструкций основания, трибун и покрытия сооружения в ПК STARK ES.

Стадион «Краснодар», с одновременным пребыванием до 33 тыс. зрителей, представляет собой в плане овал с габаритами примерно  $190,0 \times 230,0$  м, высотой трибун до 25,23 м и высотой покрытия над полем до 38,0 м. Конструктивная схема трибун и подтрибунных помещений решена в виде монолитного железобетонного каркаса с нерегулярной сеткой колонн. Покрытие над трибунами стадиона представляет собой предварительно напряженную вантовую систему с двумя сжатыми стальными коробчатыми наружными контурами и растянутым внутренним кольцом, состоящим из набора восьми тросов. По системе вант натянута ортотропная полимерно-стеклотканевая мембрана толщиной 0,8 мм.

Сооружение рассчитано на восприятие 8-балльного землетрясения. Статический и динамический расчет конструкции выполнен с учетом начального предварительно напряженного состояния покрытия, геометрической и конструктивной (односторонняя работа вант и мембранны на растяжение) нелинейностей. Проверочный расчет конструкций стадиона, выполненный с использованием ПК STARK ES, подтвердил надежность и конструктивных решений, предложенных проектировщиком.

Для 30-ти этажного многофункционального гостиничного комплекса 5\* «Ойстер Гранд Отель энд Спа» в г. Анапе Краснодарского края была разработана специальная методика расчета на сейсмические воздействия, в т.ч. с учетом указаний актуализированных сводов правил [8], утвержденных с 01 июля 2015 г. в соответствии с распоряжением правительства РФ №1521 от 26 декабря 2014 г. в качестве обязательных к применению национальных стандартов Российской Федерации. Здание имеет в плане форму эллипса, с плавным изменением этажности и 2-3-х этажной стилобатной частью, общая высота комплекса 112.650 м, максимальные размеры в плане 170x150 м. Фундамент представляет собой кессонную плиту общей высотой 4,4 м, состоящий из плит с толщинами 1,8 и 0,8 м, связанных перемычками высотой 1,8 м. Нижняя часть здания (технический этаж) запроектирована с конструктивным решением в виде монолитного железобетонного каркаса и плит перекрытий. Верхняя часть запроектирована с конструктивным решением в виде стального рамно-связевого каркаса, представленного стальными рамами, расположенными в поперечном и продольном направлении здания. Пространственная жесткость и устойчивость здания в поперечном и продольном направлениях обеспечивается совместной работой фундаментов, рам, связей и дисков перекрытий. Архитектурная и расчетная модели сооружения представлены на рисунке 3.

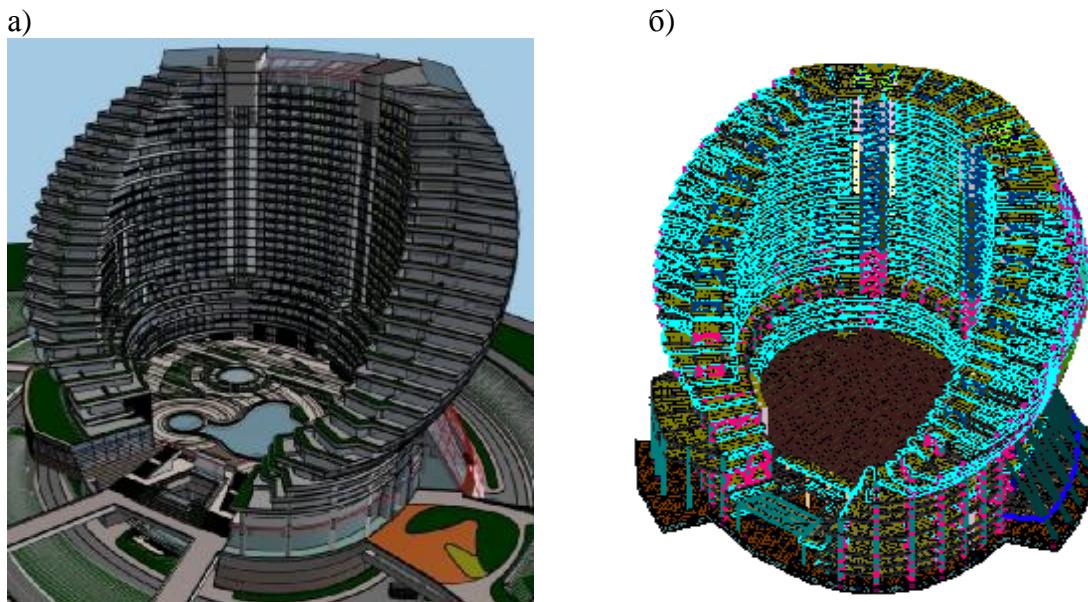


Рисунок 3 – 30-ти этажный многофункциональных комплекс в г. Анапа:  
а – архитектурная модель; б – расчетная модель в ПК STARK ES.

После построения расчетной модели был выполнен анализ природных акселерограмм для установления вида и параметров волновой модели сейсмического воздействия при расчетах на сейсмостойкость. Получены параметры, необходимые для анализа в частотной и временной областях: компоненты вектора ускорений поступательного и ротационного движений, отфильтрованные по длинам волн, коэффициенты динамичности и нормированные коэффициенты интенсивностей для поступательного и ротационного движения. Определение параметров сейсмического воздействия и анализ динамической реакции конструкций здания произведены при помощи специального модуля ОДИССЕЙ и ПК STARK ES.

Для рассматриваемого здания гостиничного комплекса были выполнены следующие расчеты на сейсмические воздействия (9 баллов):

1. Расчеты по спектральной теории:

- с использованием данных СТУ с рассмотрением наиболее опасных направлений воздействия с учетом ротации;
- с использованием уточненных данных Института физики Земли (далее ИФЗ) для трех сценарных землетрясений с учетом ротации;
- с применением дифференцированной модели сейсмического воздействия.

2. Расчет во временной области на максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) с использованием акселерограмм, синтезированных в ИФЗ для трех сценарных землетрясений.

Учет пространственного характера сейсмического воздействия позволил получить расчетное НДС конструкций, которое по своему характеру и по интенсивности усилий полнее и корректнее соответствует фактическому НДС при землетрясении. Внедрение пространственных расчетных моделей сейсмического воздействия в проектную практику повышает надежность зданий и сооружений, возводимых в сейсмических районах страны.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров, Ю.П. Аналитические основы расчета сооружений на сейсмические воздействия [Текст]. – М.: Наука, 2010. – 468 с.
2. Назаров, Ю.П. Расчетные модели сейсмических воздействий [Текст]. – М.: Наука, 2012. – 413 с.
3. Якушев, В.Л Решение большеразмерных задач строительной механики методом конечных элементов в программном комплексе STARK ES [Текст] / В.Л. Якушев, В.Н. Симбиркин, А.В. Филимонов // Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы: Сб. трудов международной научно-практической конференции. – М.: МГСУ, 2010. – С. 516-526.
4. Симбиркин, В.Н. Определение собственных форм колебаний при расчете сооружений на сейсмические воздействия [Текст] / В.Н. Симбиркин, А.В. Филимонов // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 3. – С. 27-30.
5. СП 14.1330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*. – М.: Минрегион России, 2014. – 84 с.
6. Симбиркин, В.Н. Определение опасных направлений сейсмического воздействия для пространственных сооружений [Текст] / В.Н. Симбиркин, А.В. Филимонов // Вестник НИЦ «Строительство». Исследования по теории сооружений: Сб. статей. Вып. 6 (XXXI) / под ред. И.И. Ведякова и Г.С. Варданяна. – М.: НИЦ «Строительство», 2012. – С. 23-30.
7. Симбиркин, В.Н. Расчетное обоснование проектов пространственных сооружений в сейсмических районах [Текст] / В.Н. Симбиркин, Ю.В. Панасенко // Будівельні конструкції, выпуск 76. – Киев, 2012. – Вып. 76. – С. 215-221.
8. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\* // Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ, 2014. – 131 с.

#### Ю.В. Панасенко

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, г. Москва.

Руководитель группы экспериментальных расчетов лаборатории автоматизации исследований и проектирования сооружений.

E-mail: [panyuriy@eurosoft.ru](mailto:panyuriy@eurosoft.ru)

Yu. PANASENKO

## KUCHERENKO CRSISC EXPERIENCE OF STARK ES SOFTWARE APPLYING

*The paper considers the problem of choice of an appropriate analysis model and calculation method for constructions. Some ways to evolution of the seismic impact analysis of building constructions are proposed. Several numerical examples showing an implementation of them in Russian software STARK ES are given. The software package STARK ES has a special seismic mode of modal analysis, which automatically determines the sufficient number of natural modes, selects the most relevant of ones and also takes into account the influence of the high unfound forms of vibrations.*

**Keywords:** the finite element method, software, computation model, seismic effects

### BIBLIOGRAPHY

1. Nazarov, YU.P. Analiticheskiye osnovy rascheta sooruzheniy na seysmicheskiye vozdeystviya [Tekst]. – M.: Nauka, 2010. – 468 s.
2. Nazarov, YU.P. Raschetnyye modeli seysmicheskikh vozdeystviy [Tekst]. – M.: Nauka, 2012. – 413 s.
3. Yakushev, V.L Resheniye bol'sherazmernykh zadach stroitel'noy mekhaniki metodom konechnykh elementov v programmnom komplekse STARK ES [Tekst] / V.L. Yakushev, V.N. Simbirkin, A.V. Filimonov // Teoriya i praktika rascheta zdaniy, sooruzheniy i elementov konstruktii. Analiticheskiye i chislennyye metody: Sb. tru-dov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – M.: MGSU, 2010. – S. 516-526.
4. Simbirkin, V.N. Opredeleniye sobstvennykh form kolebaniy pri raschete sooruzheniy na seysmiche-skiye vozdeystviya [Tekst] / V.N. Simbirkin, A.V. Filimonov // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. – 2012. – № 3. – S. 27-30.
5. SP 14.1330.2014. Stroitel'stvo v seysmicheskikh rayonakh. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-7-81\*. – M.: Minregion Rossii, 2014. – 84 s.
6. Simbirkin, V.N. Opredeleniye opasnykh napravleniy seysmicheskogo vozdeystviya dlya prostran-stvennykh sooruzheniy [Tekst] / V.N. Simbirkin, A.V. Filimonov // Vestnik NITS «Stroitel'stvo». Issledova-niya po teorii sooruzheniy: Sb. statey. Vyp. 6 (XXXI) / pod red. I.I. Vedyakova i G.S. Vardanyana. – M.: NITS «Stroitel'stvo», 2012. – S. 23-30.
7. Simbirkin, V.N. Raschetnoye obosnovaniye projektov prostranstvennykh sooruzheniy v seysmicheskikh rayonakh [Tekst] / V.N. Simbirkin, YU.V. Panasenko // Budivel'ni konstruktii, vypusk 76. – Kiyev, 2012. – Vyp. 76. – S. 215-221.
8. SP14.13330.2014. Stroitelstvo v seysmicheskikh rayonah. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-7-81\* // Ministerstvo stroitelstva i zhilischno-kommunalnogo hozyaystva RF, 2014. – 131 s.

### Yu. Panasenko

Kucherenko CRSISC, Moscow.

Head of the expert calculation group of automation research and design structures laboratory

E-mail: [panyuriy@eurosoft.ru](mailto:panyuriy@eurosoft.ru)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРА НДС ФАНЕРНЫХ ОБШИВОК В СОСТАВЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Приводятся результаты экспериментальных исследований обшивок замкнутой цилиндрической оболочки из деревянных kleеных круговых и цельных продольных ребер (шпангоутов и стрингеров) и жестко закрепленных к ним листов фанеры. Оболочка средней длины представляет собой модель пролетного строения транспортерной галереи в масштабе 1:4. Технологические нагрузки от веса транспортеров прикладываются к поперечным ребрам. Шпангоуты играют роль элементов жесткости, а продольные усилия и моменты воспринимаются стрингерами и обшивками. Последние воспринимают также сдвигающие усилия и находятся в сложном напряженном состоянии. Ячейки каркаса модели размерами 75x39 см служат опорами листов фанеры толщиной 4 мм. В приопорных участках оболочки сдвигающие усилия в обшивке достигают максимальных значений и служат причиной местной потери устойчивости. Критические напряжения, равные 1,6 МПа возникают при нагрузке, несколько превышающей расчетную, однако обшивка продолжает воспринимать повышающуюся нагрузку вплоть до 3,1 расчетной величины, когда происходят местные разрушения. При всех меньших нагрузках при снятии их следы местной потери устойчивости полностью исчезают. Эти интересные явления, обнаруженные и используемые ранее (например, в ЦАГИ при проектировании самолетов), могут быть использованы в современных конструкциях, в частности, при запроектных нагрузках, действующих кратковременно.

Материалы статьи содержат необходимые обобщения и предназначаются для программирования и использования в действующих программах для ЭВМ.

**Ключевые слова:** пространственные конструкции из дерева и плитных материалов, нелинейная работа при местной потере устойчивости обшивок.

В ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко проведены исследования сложного напряженного состояния ребристых оболочек из древесины и фанеры при различных нагрузках [1,2] (Рисунок 1).

Выявлены значительные резервы несущей способности при кратковременных нагрузках и силового сопротивления при длительных постоянных и изменяющихся нагрузках. Исследованы вопросы нелинейных деформаций и перераспределения усилий в статически неопределенных конструкциях, когда проявляются свойства живучести, приспособляемости, способствующие обеспечению конструктивной безопасности сооружений [3,4,5]. Испытания проводили применительно к конструкциям стен жилых домов, покрытий производственных зданий, в частности, большепролетных и уникальных. Эксперименты выполняли на основных типах оболочек, состоящих из криволинейных или прямолинейных стержней, образующих ячейки каркаса и панелей или листов фанеры, жестко закрепляемых к ребрам. В таких конструкциях элементы заполнения ячеек каркаса при неравномерных нагрузках работают преимущественно на сдвиг плит и панелей при обжатии. Здесь наиболее отчетливо проявляются общие закономерности деформирования. При достаточно толстых плитах ограждения, в частности, анизотропных, предельные усилия в них требуют применения критериев прочности. Здесь эффективно показали себя критерии Г.А. Гениева [6].

В случае тонких плит может проявляться местная потеря устойчивости, которая приводит к образованию полей диагональных растяжений Г. Вагнера и волн на обшивке вдоль №1 (63) 2016 (январь-февраль)



Рисунок 1 – Общий вид модели сборной оболочки в проектном положении

её диагонали. При этом, как выяснилось, специалистами ЦАГИ в конце 30-х годов прошлого века, плита продолжает воспринимать увеличивающуюся нагрузку, до 3-х раз превышающую критическую. В наших опытах эти явления подтверждались несмотря на специфику нагружения строительных конструкций.

В статье указанные эффекты излагаются по результатам испытаний крупномасштабной модели транспортерной галереи в виде замкнутой цилиндрической оболочки (рисунок 1), состоящей из системы kleеных деревянных ребер продольных (стрингеров) и поперечных (шпангоутов), объединенных фанерной обшивкой. Устройство модели показано на рисунке 2.

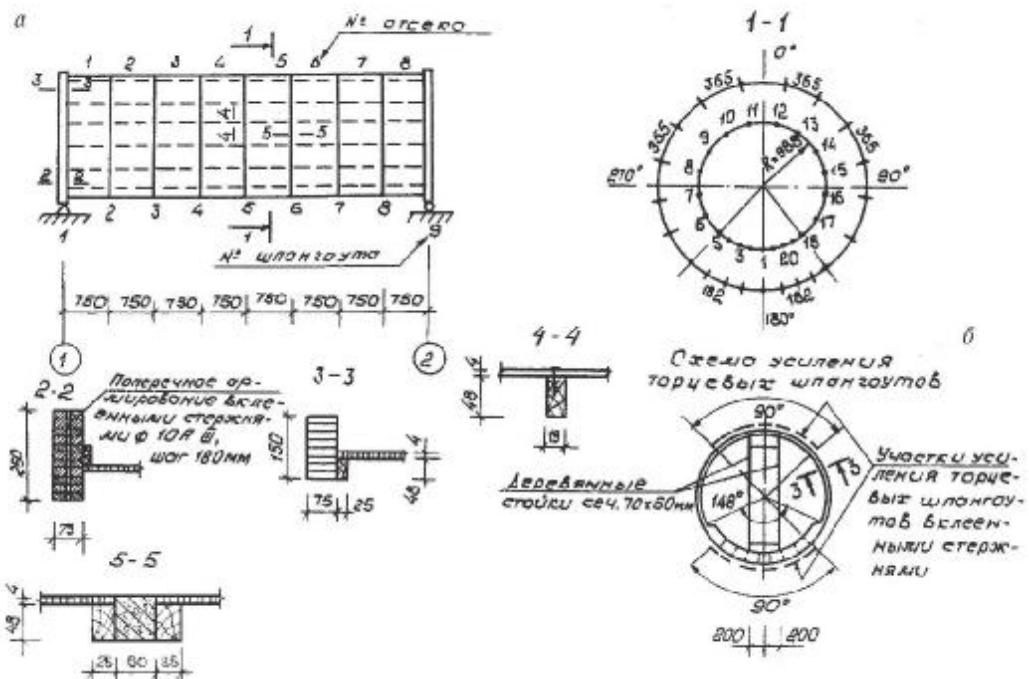


Рисунок 2 – Схематический чертеж экспериментальной оболочки:  
а) схема конструкции и узлов оболочки; б – схема усиления торцевых шпангоутов

Сосредоточенные нагрузки от технологического оборудования прикладывались к шпангоутам в соответствии с нормативными документами [16]. Модель проектировали с учетом принципов моделирования в масштабе 1:4 по отношению к натурной конструкции. Подробно результаты исследований рассматривались в работах [1,2,7]. Здесь наиболее характерные особенности деформирования тонких обшивок приводятся применительно к последующему программированию расчетов и использованию в действующих комплексах для ЭВМ.

Испытания модели показали высокую эффективность совместной работы обшивок пролетного строения с элементами «силового набора» - шпангоутами и стрингерами. Модель без специального конструктивного усиления выдержала нагрузку  $P = 204,92$  кН или 2,22 расчетной, т.е. обеспечен вполне приемлемый коэффициент надежности.

Особенностью работы исследуемой конструкции является местная потеря устойчивости обшивок в зоне двух отсеков, примыкающих к каждому торцу оболочки, а также появление радиальных усилий растяжения в шпангоутах (диафрагмах). Эти наиболее уязвимые места требуют особого внимания при проектировании. Сечения диафрагм необходимо усиливать вклеенными стержнями в радиальном направлении. В модели, усиленной вклеенными стержнями, разрушающая нагрузка возросла до 224,9 кН, а коэффициент надежности – до 3,11.

Граница области упругой работы оболочки до усиления контура соответствует нагрузке  $P = 147,05$  кН или  $1,6 P_{расч.}$

Для оболочки с жестким контуром верхняя граница упругой работы поднимается еще выше и соответствует нагрузке 155,7 кН, что превышает ее расчетную несущую способность в 2,15 раза.

Участки торцевых шпангоутов с изгибающим моментом, уменьшающим кривизну кольца, включая и те, на которых произошел разрыв поперек волокон, были усилены вклеенными поперечными стержнями из арматуры периодического профиля класса А-III диаметром 10 мм. Кроме того, эти шпангоуты были подкреплены дискретными вертикальными стержнями (деревянные стойки сечением 70×50 мм). Жесткость оболочки с усиленным контуром в направлении вертикального и горизонтального диаметров увеличилась в среднем соответственно в 16 и 8 раз.

Во всех последующих испытаниях модель загружали нагрузкой от технологического оборудования. Было выполнено три нагружения модели с контуром, усиленным вертикальными стойками. Нагружение выполняли ступенями по 4,5 кН или  $0,02 P_{разр.}$ . На каждом этапе нагрузки с помощью розеток тензорезисторов, смонтированных на приопорных панелях 7-8 опорного отсека I, фиксировали относительные деформации обшивки по контуру панели и в направлении диагоналей. В каждой точке обшивки розетки наклеивали с двух сторон, что позволило определить, как осевые, так и изгибные напряжения и контролировать форму деформированной поверхности панели после потери устойчивости обшивки. В развитом поле выпучин замеряли перемещения оболочки с помощью прогибомера с ценой деления 0,01 мм. Размеры ячеек обшивки между ребрами равны 75×39 см.

Начало выпучивания обшивки

было отмечено по приборам на четвертой ступени нагружения. Местную потерю устойчивости обшивки в визуальной форме можно было наблюдать на седьмой ступени загружения по образованию выпучины в центре панели 7-8 (рисунок 3). С ростом нагрузки первоначальная картина поля выпучин в пределах исследуемой панели не менялась, лишь увеличивались размеры и глубина складки. Диаграмма  $P - \varepsilon$  зависимости относительных деформаций обшивки от нагрузки в направлении сжатой диагонали позволяет определить нагрузку, соответствующую моменту потери устойчивости обшивки. Величина критической нагрузки  $P_{kp} = 0,35 P_{разр.}$  определяется ординатой нулевой точки – смены знака относительных деформаций на диаграмме  $P - \varepsilon$ , построенной по показателям тензорезистора, смонтированного с внутренней стороны обшивки и показывает, что выпучивание происходит в сторону центра кривизны. Аналогичную форму имеет график зависимости прогиба панели 7-8 от нагрузки (рисунок 3), имеющий в диапазоне нагрузок, превышающих расчетные значения, явно выраженный нелинейный характер с точками перегиба кривой, соответствующих смене форм равновесия обшивки.

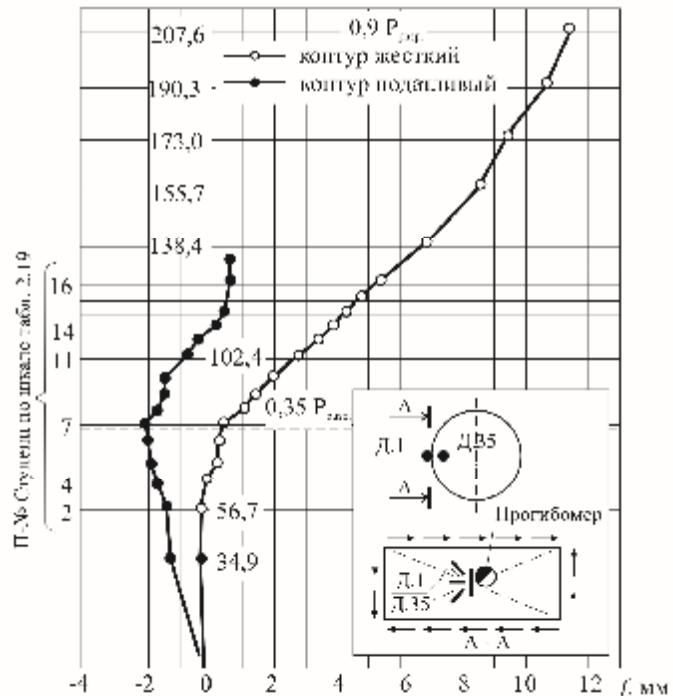


Рисунок 3 – График зависимости прогибов панели 7-8 от нагрузки

Момент потери устойчивости обшивки в оболочке с жестким и податливым контуром наступает практически при одной и той же нагрузке  $P_{kp} = 77,6 \text{ кН}$  или  $0,35 P_{разр}$ . Вместе с тем, в приконтурной зоне обшивка оболочки с усиленными диафрагмами работает в более жестких условиях, чем с податливым контуром. Прогиб, замеренный в центре панели 7-8 при нагрузке  $1,6 P_{kp}$  ( $n = 16$ ) для оболочки с жестким и податливым контуром составил соответственно  $5,45 \text{ мм}$  и  $2,18 \text{ мм}$  (с учётом выгиба).

Экспериментом выявлено наличие значительных изгибающих деформаций в поле панели в направлениях параллельных главным сжимающим напряжениям. Максимальные изгибающие деформации в диагональных направлениях обшивки при нагрузке  $P = 1,1 P_{kp}$  характеризуются глубиной выпучины в центре панели  $f = 1,13 \text{ мм}$ , т.е. достаточно малы. Эпюры имеют знакопеременный характер, достигая экстремальных значений по гребням волн с нулевыми значениями в точках перегиба, повторяя очертания деформированной поверхности обшивки. Волны располагаются в направлении главных растягивающих напряжений и имеют кривизну не только в направлении сжатой диагонали, но и в ортогональном направлении. Здесь при нагрузке  $1,1 P_{kp}$  в обшивке преобладают главные сжимающие напряжения порядка  $2,5\text{-}3,5 \text{ МПа}$ , их распределение в диагональных направлениях близко к равномерному.



Рисунок 4 – Формы разрушения оболочки. Вырывающий эффект складок

На отдельных участках оболочки наблюдалась ещё одна, особая форма разрушения, обусловленная вырывающим действием складок, когда местная потеря устойчивости обшивки стремилась перейти в общую. У соединения с кольцевыми рёбрами обшивка отделялась от рёбер вместе с гвоздями, которые использовались для её запрессовки в процессе склеивания.

Результаты выполненных замеров показали следующее. Вблизи повреждений в опорном отсеке 8 (панель 7-8) осевые относительные деформации обшивки в направлении главных растягивающих напряжений составили  $\varepsilon_{135^\circ} = 488,10^{-5}$  относительных единиц, при этом главные растягивающие напряжения в обшивке были  $23,1 \text{ МПа}$ , что близко к временному сопротивлению трёхслойной берёзовой фанеры растяжению поперёк волокон  $R_{\text{ср}} = 28,0 \text{ МПа}$ . В подкрепляющих рёбрах нормальные напряжения не достигли расчётных сопротивлений.

В торцевых шпангоутах максимальные напряжения также не достигли расчётных сопротивлений и составили  $7,0 \text{ МПа}$ . В середине пролёта оболочки максимальные напряжения

на двенадцатой ступени нагружения, спустя 7 секунд после приложения нагрузки, произошло разрушение оболочки в виде отрыва части обшивки в опорном отсеке 8, носившее местный характер и не вызвавшее полного обрушения конструкции (рисунок 4). Разрушающая нагрузка составила  $224,9 \text{ кН}$  или  $3,11 P_{разр}$ . Разрушение оболочки носило хрупкий характер, произошло при нагрузке в 2,9 раза превышающей критическую. Обследованием повреждённых участков установлены следующие формы разрушения:

1) разрыв обшивки вследствие растяжения поперёк волокон наружных шпонов;

2) разрушение клеевых соединений обшивки с ребрами, повреждения стрингеров 4, 5 в результате скольжения древесины вдоль волокон, как следствие резкого перераспределения усилий при разрыве обшивки. Повреждения обшивки имели место практически по всей боковой поверхности опорного отсека оболочки со стороны образующей  $270^\circ$ , на участке между стрингерами 2-10.

На отдельных участках оболочки наблюдалась ещё одна, особая форма разрушения, обусловленная вырывающим действием складок, когда местная потеря устойчивости обшивки стремилась перейти в общую. У соединения с кольцевыми рёбрами обшивка отделялась от рёбер вместе с гвоздями, которые использовались для её запрессовки в процессе склеивания.

Результаты выполненных замеров показали следующее. Вблизи повреждений в опорном отсеке 8 (панель 7-8) осевые относительные деформации обшивки в направлении главных растягивающих напряжений составили  $\varepsilon_{135^\circ} = 488,10^{-5}$  относительных единиц, при этом главные растягивающие напряжения в обшивке были  $23,1 \text{ МПа}$ , что близко к временному сопротивлению трёхслойной берёзовой фанеры растяжению поперёк волокон  $R_{\text{ср}} = 28,0 \text{ МПа}$ . В подкрепляющих рёбрах нормальные напряжения не достигли расчётных сопротивлений.

В торцевых шпангоутах максимальные напряжения также не достигли расчётных сопротивлений и составили  $7,0 \text{ МПа}$ . В середине пролёта оболочки максимальные напряжения

в стрингерах и шпангоутах составили соответственно  $\sigma_{cpr} = -6,8$  МПа,  $\sigma_{un} = 7,6$  МПа, т.е. не достигли расчетных сопротивлений.

Анализ работы конструкции показал, что при выпучивании несущая способность обшивки не исчерпывается. Вследствие оправления обшивки на ребра размеры выпучин ограничены, и обшивка не только продолжает нести критическую, но и воспринимает послекритическую нагрузку. Согласно эксперименту по мере увеличения внешней нагрузки пропорционально ей растут напряжения сдвига  $\tau_{xy}$  (рисунок 5, б). Кривая главных растягивающих напряжений  $\sigma_1$  имеет нелинейный характер, точки перегиба кривой соответствуют таковым на кривой прогибов (рисунок 5, а) и обусловлены сменой форм равновесия обшивки. Прирост же главных сжимающих напряжений и доля их участия в работе обшивки снижаются (рисунок 5, б, в).

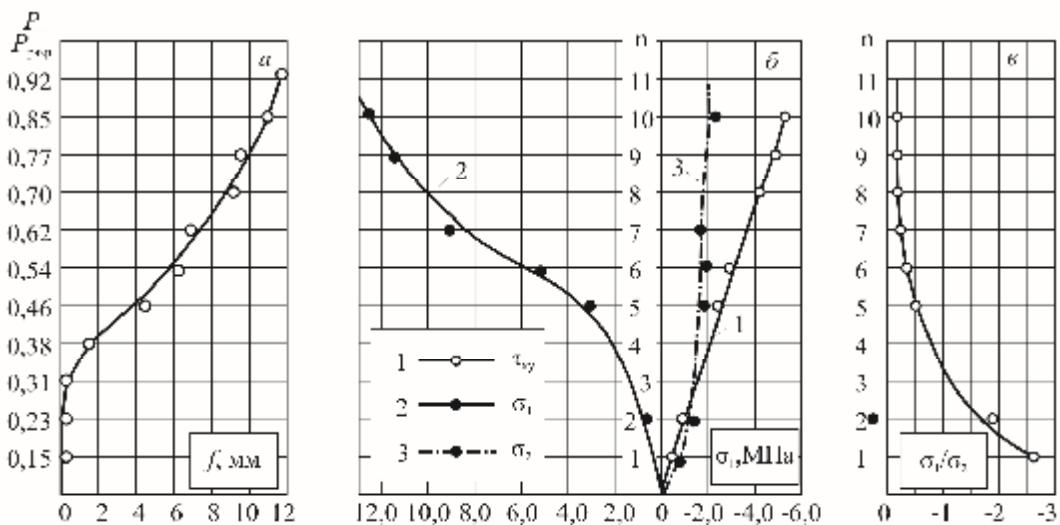


Рисунок 5 – Экспериментальные зависимости компонент напряженно-деформированного состояния обшивки в поле сдвига от нагрузки

### Выводы

1. Исследования крупномасштабной модели выявили характерные особенности совместной работы тонких обшивок из фанеры с каркасом из клееной древесины при различных нагрузках, в том числе запроектных, кратковременное действие которых может превышать расчетные почти в 3 раза. При этом допускается местная потеря устойчивости обшивок в ячейках между ребрами. После уменьшения или снятия нагрузок следы местной потери устойчивости исчезают.

2. На модели пространственной конструкции характер деформирования и количественные характеристики НДС комплексной конструкции проявляются наиболее отчетливо. Подобные конструкции распространены в панелях стен и покрытий жилых и производственных зданий, особенно большепролетных, в частности, и в тех, которые пока проектируются по плоскостной схеме, и тогда большие резервы силового сопротивления и расхода материалов остаются неиспользованными.

3. Полученные результаты могут быть использованы для теоретических обобщений как для стадии предварительного проектирования, так и для окончательного уточненного расчета на ЭВМ. Предполагается программирование расчетов как дополнение к действующим программам, использующим итерационные процессы. При этом данные, приведенные в статье могут быть использованы как ориентировочные.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пятикрестовский, К.П. Исследования замкнутой цилиндрической оболочки из клееной древесины и фанеры [Текст] / К.П. Пятикрестовский, О.Г. Черных // Строительная механика и расчет сооружений. – 2007. – №5. – С. 72-84.
2. Пятикрестовский, К.П. Исследования совместной работы обшивок и каркаса замкнутой цилиндрической оболочки из клееной древесины и фанеры [Текст] / К.П. Пятикрестовский, О.Г. Черных // Строительная механика и расчет сооружений. – 2007. – №6. – С.73-80.
3. Гениев, Г.А. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях: научное издание [Текст] / Г.А. Гениев, В.И. Колчунов, Н.В. Клюева, А.И. Никулин, К.П. Пятикрестовский. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004. – 216с.
4. Колчунов, В.И. Пространственные конструкции покрытий. Курсовое и дипломное проектирование. Учебное пособие [Текст] / В.И. Колчунов, К.П. Пятикрестовский, Н.В. Клюева. – М.: изд-во АСВ, 2008. – 352 с.
5. Бондаренко, В.М. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях [Текст] / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №2. – С.28-31.
6. Гениев, Г.А. Вопросы длительной и динамической прочности анизотропных конструкционных материалов: брошюра [Текст] / Г.А. Гениев, К.П. Пятикрестовский. – М.: ГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2000г. – 38с.
7. Пятикрестовский, К.П. О программировании нелинейного метода расчёта статически неопределеных деревянных конструкций и связи программных комплексов с совершенствованием норм проектирования [Текст] / В.И. Травуш, К.П. Пятикрестовский // АКАДЕМИА. Архитектура и строительство. – 2015. – №3. – С.115-119.
- 8 Пятикрестовский, К.П. Нелинейные методы механики в проектировании современных деревянных конструкций: монография [Текст] / К.П. Пятикрестовский. – М.: МГСУ, 2014. – 320 с.

**К.П. Пятикрестовский**

АО «НИЦ «Строительство», ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, г. Москва

Доктор технических наук, профессор

E-mail: [stroymex@list.ru](mailto:stroymex@list.ru)

**В.И. Травуш**

Российская академия архитектуры и строительных наук, г. Москва

Академик РААСН, доктор технических наук, профессор

E-mail: [travush@mail.ru](mailto:travush@mail.ru)

---

K. PYATIKRESTOVSKY, V. TRAVUSH

## EXPERIMENTAL STUDIES OF VAT OF PLYWOOD SHEATHING, WHICH ARE PART OF SPATIAL STRUCTURES

*The article describes the results of experimental studies of a closed cylindrical shell. This shell made of one-piece circular and longitudinal laminated wood ribs (frames and stringers) and plywood sheets, clamped in the ribs. The shell is a model of ceiling structure of the transport gallery in the scale of 1:4. Weight of transporters is attached to transverse ribs. The frames act as stiffeners, and longitudinal forces and moments are perceived by stringers and sheathing. The sheathing perceives shearing force and one is subjected complex stress state. The cells of frame model have 75x39 cm size and covered by plywood of 4 mm thickness. Shearing forces in the boundary of the shell reaches maximum values. It can lead to local buckling. Critical stresses (equal to 1.6 MPa) are result of action of the load, which slightly exceeds the calculated values. However, the sheathing bears an increasing load up to 3.1 calculated values, when local destructions occur. If loadings are smaller than ones, the local buckling disappear completely after unloading. These interesting phenomena, which are discovered and used earlier (e.g. in CAI in the design of aircraft), can be used in structures, in particular, when unexpected temporary loading act.*

*The materials of the paper contain the necessary generalizations, and can be used in a computer program.*

**Keywords:** spatial structures made of wood and plate materials, non-linear local buckling of sheathing.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Pyatikrestovskiy, K.P. Issledovaniya zamknutoy tsilindricheskoy obolochki iz kleyenoy drevesiny i fanery [Tekst] / K.P. Pyatikrestovskiy, O.G. Chernykh // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. – 2007. – №5. – S. 72-84.
2. Pyatikrestovskiy, K.P. Issledovaniya sovmestnoy raboty obshivok i karkasa zamknutoy tsilindricheskoy obolochki iz kleyenoy drevesiny i fanery [Tekst] / K.P. Pyatikrestovskiy, O.G. Chernykh // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. – 2007. – №6. – S.73-80.
3. Geniyev, G.A. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstruktsiy pri zaproyektivnykh vozdeystviyakh: nauchnoye izdaniye [Tekst] / G.A. Geniyev, V.I. Kolchunov, N.V. Klyuyeva, A.I. Nikulin, K.P. Pyatikrestovskiy. – M.: Izd-vo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2004. – 216s.
4. Kolchunov, V.I. Prostranstvennyye konstruktsii pokrytiy. Kursovoye i diplomnoye proyektirovaniye. Uchebnoye posobiye [Tekst] / V.I. Kolchunov, K.P. Pyatikrestovskiy, N.V. Klyuyeva. – M.: izd-vo ASV, 2008. – 352 s.
5. Bondarenko, V.M. Kontsepsiya i napravleniya razvitiya teorii konstruktivnoy bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy pri silovykh i sredovykh vozdeystviyakh [Tekst] / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. – 2013. – №2. – S.28-31.
6. Geniyev, G.A. Voprosy dlitel'noy i dinamicheskoy prochnosti anizotropnykh konstruktsionnykh materialov: broshyura [Tekst] / G.A. Geniyev, K.P. Pyatikrestovskiy. – M.: GUP TSNIISK im. V.A. Kucherenko, 2000g. – 38s.
7. Pyatikrestovskiy, K.P. O programmirovaniii nelineynogo metoda raschota staticheski neopredeli-mykh derevyanых konstruktsiy i svyazi programmnykh kompleksov s sovershenstvovaniyem norm proyektirovaniya [Tekst] / V.I. Travush, K.P. Pyatikrestovskiy // AKADEMIA. Arkhitektura i stroitel'stvo. – 2015. – №3. – S.115-119.
- 8 Pyatikrestovskiy, K.P. Nelineynyye metody mekhaniki v proyektirovaniii sovremennykh derevyanых konstruktsiy: monografiya [Tekst] / K.P. Pyatikrestovskiy. – M.: MGSU, 2014. – 320 s.

**K. Pyatikrestovskiy**

Central research Institute of building structures named after V.A. Kucherenko, Moscow

Doctor of technical sciences

E-mail: [stroymex@list.ru](mailto:stroymex@list.ru)

**V. Travush**

Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow

RAACS academician, doctor of technical sciences, professor

E-mail: [travush@mail.ru](mailto:travush@mail.ru)

## **БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

УДК 624.05

КОНСТАНТИНОВ И.С., ПИЛИПЕНКО О.В., ПОЛЬЩИКОВ К.А., ИВАЩУК О.Д.

### **К ВОПРОСУ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СВЯЗИ В ПРОЦЕССЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ СТРОИТЕЛЬСТВА<sup>2</sup>**

*Для обеспечения связи в процессе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на строящихся объектах предложено использовать беспроводную основанную на технологии MANET самоорганизующуюся сеть, которая характеризуется быстрым развертыванием, высокой живучестью и способностью доставлять информацию между мобильными узлами, подверженными интенсивному воздействию деструктивных факторов. Одним из элементов технологического процесса строительства опасных объектов должно стать развертывание указанной сети для своевременного обнаружения факторов, которые могут привести к пожарам, взрывам, разрушению, затоплению, воздействию ядовитых веществ и радиационного излучения, а также организации управления при ликвидации их последствий.*

**Ключевые слова:** строительство опасных объектов, чрезвычайные ситуации, роботизированные средства, обеспечение связи, беспроводная самоорганизующаяся сеть

#### **Введение**

В строительной отрасли трудно переоценить значение мероприятий по защите людей и сооружаемых объектов от аварий, катастроф и стихийных бедствий [1, 2]. В соответствии с Постановлением Правительства России от 14.04.2015 № 352 в ведении Минстроя Российской Федерации находится один из неотъемлемых элементов Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций – функциональная подсистема предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на объектах, входящих в сферу строительства и жилищно-коммунального хозяйства.

Эффективное функционирование указанной подсистемы невозможно без применения телекоммуникационных сетей специального назначения, позволяющих решать следующие задачи:

1) мониторинг на объектах строительства [2], реализуемый с целью своевременного обнаружения явлений и деструктивных факторов природного и техногенного характера, приводящих к пожарам, взрывам, разрушению, затоплению, воздействию ядовитых веществ и радиационного излучения;

2) обеспечение управления силами и средствами в процессе ликвидации чрезвычайных ситуаций на строящихся объектах с целью минимизации человеческих жертв и материального ущерба.

Особую важность решение этих задач приобретает в ходе подземного строительства. Прокладываемые тоннели, метрополитены и другие строящиеся подземные сооружения относятся к опасным объектам, обслуживание которых осуществляется Федеральным государственным казенным учреждением «Управление военизированных горноспасательных частей в строительстве» (ФГКУ «УВГСЧ в строительстве»). Постановлением Правительства Российской Федерации от 28.01.2012 № 45 регламентирована деятельность этого учреждения, имену-

<sup>2</sup> Работа выполнена в рамках исполнения проекта РФФИ № 14-41-08055 «Исследование и разработка распределенной автоматизированной системы интеллектуального экомониторинга и управления экологической безопасностью городских территориальных агломераций»

емая горноспасательным обслуживанием, в рамках которого обозначен ряд мероприятий, в том числе предупреждение и ликвидация аварий и чрезвычайных ситуаций на опасных объектах в периоды их строительства и реконструкции [3]. Одним из элементов технологического процесса строительства таких сооружений является выполнение работ, направленных на обеспечение постоянной готовности возводимых объектов к предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций. В число этих работ должно входить развертывание специализированных телекоммуникационных сетей для своевременного обнаружения факторов, которые могут привести к чрезвычайным ситуациям.

### Перспективные сети связи в чрезвычайных ситуациях

Для обеспечения связи в условиях интенсивных деструктивных внешних воздействий, характерных, для чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, востребованы телекоммуникационные сети, обладающие быстрым развертыванием, высокой живучестью, способностью доставлять информацию при динамически изменяющейся топологии (случайных процессах перемещения, уничтожения, добавления, включения и выключения узлов). Указанными возможностями обладают беспроводные самоорганизующиеся сети (Mobile Ad-Hoc Networks, MANET) [4]. Главная отличительная особенность таких сетей состоит в их децентрализованной изменяемой структуре. Поэтому их именуют «спонтанными», «эпизодическими» сетями, узлы которых соединяются произвольно, хаотично, «на лету» [5–7]. Основными особенностями построения MANET являются:

- 1) децентрализованное управление компонентами сети;
- 2) отсутствие базовых станций (фиксированных узлов);
- 3) способность каждого узла выполнять функции маршрутизатора.

В качестве примера в таблице 1 представлены характеристики беспроводной самоорганизующейся сети, предлагаемой одним из производителей [8].

Благодаря указанным преимуществам технология MANET имеет хорошие перспективы для построения беспроводных самоорганизующихся сетей (БСС), функционирующих с целью обеспечения информационного обмена в процессе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Вопросам построения БСС для обеспечения связи в условиях, угрожающих жизни людей, посвящен ряд научных исследований. Так, в [9] рассмотрена возможность применения MANET в поисково-спасательных операциях, проводимых с целью ликвидации последствий стихийных бедствий и террористических атак. Для спасения пострадавших, находящихся в районах катастроф, в [10] предложена базирующаяся на мобильной ad-hoc сети архитектура экстренной связи. В [11] представлено научно-техническое решение по формированию так называемых аварийных самоорганизующихся сетей в случаях сильного повреждения наземной телекоммуникационной инфраструктуры в результате землетрясений.

### MANET и роботы-спасатели

В перспективе для ликвидации чрезвычайных ситуаций на строящихся объектах целесообразно активное применение роботизированных средств. В частности, отечественными и зарубежными разработчиками предлагаются мобильные радиоуправляемые установки, предназначенные для тушения пожаров и осуществления разведки в непригодной для дыхания среде [12–15]. Основным преимуществом таких роботов является способность работать в условиях большой задымленности и высокой температуры. Благодаря небольшим размерам и огнеупорному корпусу такие аппараты могут добираться до самых труднодоступных мест. Тактико-технические характеристики мобильного робототехнического комплекса разведки и пожаротушения, выпускаемого одним из отечественных производителей [14], представлены в таблице 2.

Для эффективного управления подобными средствами и координации их действий требуется применение телекоммуникационной сети, способной обеспечить оперативную достав-

ку данных, содержащих управляющие команды, сведения о местоположении роботов, их состоянии, параметрах окружающей среды, состоянии пострадавших объектов и т.п.

Таблица 1 – Характеристики беспроводной самоорганизующейся сети

Наименование параметра (характеристики)	Значение (описание)
1	2
Архитектура сети	Одноуровневая сетевая архитектура, соединение устройство – устройство, отсутствие фиксированной инфраструктуры (мобильность каждого абонента), каждый узел является одновременно хостом и ретранслятором с функциями маршрутизатора
Поддерживаемые виды трафика	Данные, речь, видео
Области применения	Сенсорные сети, беспроводная передача видео с автономных видеокамер, аварийные сети, домашние сети «умный дом», автомобильные сети, сети связи в удаленных труднодоступных районах, сети связи военного назначения тактического уровня
Принцип организации передачи информации	Коммутация пакетов с использованием многоскаковой маршрутизации
Характеристики физического уровня	Стандарт IEEE 802.15.4–2006, диапазон частот 2,40 – 2,48 ГГц, модуляция GFSK/FSK
Метод доступа канального уровня	CSMA/CA, ALOHA
Протоколы сетевого уровня	IPv6 (RFC 3513), маршрутизация DSR (RFC 4728), AODV (RFC 3561)
Количество узлов в сети	Неограниченное (по протоколу IPv6)
Максимальная канальная скорость передачи данных	До 2 Мбит/с
Максимальное время маршрутизации	400 мс
Вхождение узла в сеть	Без координатора, в реальном времени («на лету»)
Возможность режима радиомолчания	Возможен для всех узлов
Автономное питание (от батареи)	Возможно для всех узлов
Разведзашщщенность	Высокая
Живучесть	Очень высокая
Характеристики развертывания	Быстрое развертывание, легкое наращивание узлов
Характеристики модуля радиосети	Количество каналов – 16, максимальная выходная мощность – 100 мВт, размер буфера данных – 65 КБ, длительность перехода из режима радиомолчания для передачи пакета – 0,5 мс, напряжение питания – 5 В, габариты печатной платы – 30 × 50 мм, масса – 10 г

**Таблица 2 – Тактико-технические характеристики мобильного робототехнического комплекса разведки и пожаротушения**

<b>Характеристика</b>	<b>Значение</b>	
Масса снаряженного мобильного робота	не более 360 кг	
Максимальная скорость передвижения	не менее 1 м/с	
Высота преодолеваемого порогового препятствия	0,25 м	
Допустимый угол крена, дифферента	не более 35 градусов	
Глубина преодолеваемой водной преграды	не более 0,1 м	
Глубина преодолеваемого снежного покрова	не более 0,1 м	
Расстояние дистанционного управления по кабелю	до 200 м	
Расстояние дистанционного управления по радио	до 1000 м	
Габаритные размеры мобильного робота	Длина	1,35 м
	Ширина	0,7 м
	Высота	0,8 м
Время непрерывной работы	не менее 4 ч	

Учеными предложен ряд разработок, в которых для организации связи между роботизированными системами в условиях чрезвычайных ситуаций используются сети MANET. Например, в [16] представлена технология, позволяющая с помощью БСС передавать данные для мобильных роботов, которые в условиях плохой видимости помогают спасателям в поиске очагов пожара. На основе MANET выполнен испытательный стенд, используемый для управления перемещением роботов в процессе проверки обстановки в чрезвычайных ситуациях [17].

### **БСС на строящихся объектах**

Проведенный анализ показал, что технология MANET может успешно использоваться для передачи информации в целях защиты людей и сооружений от аварий, стихийных бедствий и катастроф. Поэтому применение беспроводной самоорганизующейся сети для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на опасных объектах строительной отрасли является вполне оправданным решением.

Применение БСС в ряде случаев предоставляет единственную приемлемую возможность обеспечить связь на строящихся объектах. Например, для обмена информацией в ходе горноспасательного обслуживания подземных сооружений в периоды их строительства и реконструкции нецелесообразно использование традиционных систем сотовой, проводной и радиосвязи, обладающих недостаточной живучестью и не способных функционировать в условиях экстремальных внешних воздействий.

На строящихся сооружениях должны функционировать специальные устройства-узлы БСС с датчиками для обнаружения воды, взрывоопасных газов, радиационного излучения, ядовитых веществ, трещин, провалов, падающих предметов и т.п. В таком случае реализуемый на основе MANET информационный обмен между этими устройствами и соответствующими дежурными службами позволит своевременно обнаруживать возникающие опасности и принимать необходимые защитные меры. Кроме того, применение БСС на объектах строительства в процессе ликвидации чрезвычайных ситуаций обеспечит эффективное управление спасателями и роботизированными средствами с целью минимизации человеческих жертв и материального ущерба.

### Заключение

В отрасли строительства большое внимание уделяется мероприятиям по защите людей и сооружений от стихийных бедствий и губительных техногенных воздействий. Зачастую традиционные системы проводной, сотовой и радиосвязи не способны обеспечить обмен информацией для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, возникающих в процессе выполнения строительных работ, особенно в ходе подземного сооружения туннелей, метрополитенов и других опасных объектов. В таких условиях целесообразно использовать основанную на технологии MANET беспроводную самоорганизующуюся сеть, которая характеризуется быстрым развертыванием, высокой живучестью и способностью доставлять информацию между мобильными узлами, подверженными интенсивному воздействию деструктивных факторов.

Известны примеры успешного применения MANET для обеспечения связи при возникновении чрезвычайных ситуаций. Кроме того, в перспективе с помощью беспроводной самоорганизующейся сети будет осуществляться управление функционирующими в экстремальных условиях роботизированными средствами. Поэтому одним из элементов технологии строительства опасных объектов должно стать развертывание мобильной ad-hoc сети для своевременного обнаружения факторов, которые могут привести к чрезвычайным ситуациям, а также организации управления при ликвидации их последствий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривошапко, С.Н. Виды аварий и разрушений пространственных структур и оболочек [Текст] / С. Н. Кривошапко // Строительство и реконструкция. – 2015. – № 1. – С. 22–32.
2. Штунцайгер, И.Е. Практический опыт устройства стационарных автоматизированных систем мониторинга строительных конструкций на олимпийских объектах в городе Сочи [Текст] / И. Е. Штунцайгер, А. С. Денисова, А. И. Кугачев и др. // Строительство и реконструкция. – 2015. – № 4. – С. 67–71.
3. ФГКУ «УВГЧ в строительстве» [Электронный ресурс] // Сайт Федерального государственного казенного учреждения «Управление военизированных горноспасательных частей в строительстве». – URL: <http://www.ugvgsch.ru>.
4. Basagni, S. Mobile Ad Hoc Networking / S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, I. Stojmenovic – IEEE Press, 2004. – 461 p.
5. Константинов, И. С. Имитационная модель передачи информационных потоков в мобильной радиосети специального назначения [Текст] / И. С. Константинов, К. А. Польщиков, С. А. Лазарев // Научные ведомости БелГУ. – 2015. – № 13 (210). – Вып. 35(1). – С. 156–163.
6. Польщиков, К. А. Проблемные вопросы доставки данных в мобильной радиосети специального назначения [Текст] / К. А. Польщиков // Электросвязь. – 2015. – № 7. – С. 26–29.
7. Polshchykov, K. O. Synthesis of neuro-fuzzy systems of data flows intensity control in mobile ad-hoc network / K. O. Polshchykov // Proc. of 23rd International Crimean Conference «Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo)». – Sevastopol, 2013. – Р. 517–518.
8. Многофункциональная мобильная самоорганизующаяся сеть «МСР-Сеть» MANET 2,4 ГГц [Электронный ресурс] // Торговый портал предприятий российской промышленности. – URL: [http://www.rospromtorg.ru/catalog/section.php?SECTION\\_ID=34&ELEMENT\\_ID=5448&ORG=1526](http://www.rospromtorg.ru/catalog/section.php?SECTION_ID=34&ELEMENT_ID=5448&ORG=1526).
9. Anjum, S. S. Survey on MANET Based Communication Scenarios for Search and Rescue Operations / S. S. Anjum, R. M. Noor, M. H. Anisi // Proc. of 5th International Conference «IT Convergence and Security (ICITCS)». – Kuala Lumpur, 2015. – Р. 1–5.
10. Verma, H. MANET based emergency communication system for natural disasters / H. Verma, N. Chauhan // Proc. of International Conference «Computing, Communications & Automation (ICCCA)». – Noida, 2015. – Р. 480–485.
11. Cheong, S. H. Lifeline: Emergency Ad Hoc Network / S. H. Cheong, K. I. Lee, Y. W. Si, L. H. U // Proc. of 7th International Conference «Computational Intelligence and Security (CIS)». – Hainan, 2011. – Р. 283–289.
12. Горбань, Ю. Пожарные роботы в современных технологиях автоматического пожаротушения [Электронный ресурс] / Ю. Горбань, Е. Синельникова // Интернет-портал по безопасности. – URL: [http://secandsafe.ru/stati/pojarnaya\\_bezopasnost/pojarnye\\_robota\\_v\\_sovremennyh\\_tehnologiyah\\_avtomaticheskogo\\_pojarotusheniya](http://secandsafe.ru/stati/pojarnaya_bezopasnost/pojarnye_robota_v_sovremennyh_tehnologiyah_avtomaticheskogo_pojarotusheniya).
13. Роботизированная пожарная установка «Пеликан» [Электронный ресурс] // Официальный сайт научно-производственного объединения «Сибирский Арсенал». – URL: <http://fire-robot.ru>.
14. Мобильный робототехнический комплекс разведки и пожаротушения МРК-РП [Электронный ресурс] // Официальный сайт Научно-исследовательского центра робототехники. – URL: <http://www.vniipo.ru/>

departments/nicntr.htm.

15. Корсунский, В. Мобильные роботы как средство дистанционной борьбы с пожарами [Электронный ресурс] / В. Корсунский // Интернет-портал «Бизнес. Online». – URL: <http://www.bl.by/a176847.php>.

16. Penders, J. A robot swarm assisting a human fire-fighter / J. Penders, L. Alboul, U. Witkowski et al. // Advanced Robotics. – 2011. – Vol. 25. – Issue 1–2. – P. 93–117.

17. Kulla, E. Real World Emergency Scenario Using MANET in Indoor Environment: Experimental Data / E. Kulla, R. Ozaki, A. Uejima, H. Shimada // Proc. of 7th International Conference «Computational Intelligence and Security (CIS)». – Blumenau, 2015. – P. 336–341.

### И.С. Константинов

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород  
Доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности  
Email: [konstantinov@bsu.edu.ru](mailto:konstantinov@bsu.edu.ru)

### О.В. Пилипенко

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», г. Орел  
Доктор технических наук, профессор, ректор  
E-mail: [rector@univ-orel.ru](mailto:rector@univ-orel.ru)

### К.А. Польщиков

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем  
Email: [polshchikov@bsu.edu.ru](mailto:polshchikov@bsu.edu.ru)

### О.Д. Иващук

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород  
Кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем  
Email: [ivaschuk@bsu.edu.ru](mailto:ivaschuk@bsu.edu.ru)

---

I. KONSTANTINOV, O. PILIPENKO, K. POLSHCHYKOV, O.D. IVASCHUK

## THE ISSUE OF COMMUNICATION IN THE PROCESS OF PREVENTION AND LIQUIDATION OF EMERGENCY SITUATIONS AT CONSTRUCTION SITES

*To ensure communication in the process of prevention and liquidation of emergency situations on the construction sites it is proposed to use a self-organizing network, based on wireless technology MANET, which are characterized by rapid deployment equipment, high survivability and ability to deliver information between mobile units, exposed to intensive exposure to the destructiveness of various factors. One of the elements of building dangerous objects should be the deployment of a specific network for the early detection of factors that can lead to fires, explosions, destruction, flooding, the effects of toxic substances and radiation, as well as the organization of management in the liquidation of their consequences.*

**Keywords:** construction of hazardous facilities, emergency, robotic tools, communications, mobile ad-hoc network

## BIBLIOGRAPHY

1. Krivoshapko, S.N. Vidy avari i razrusheniy prostranstvennykh struktur i obolochek [Tekst] / S. N. Krivoshapko // Stroitel'stv i rekonstruktsiya. – 2015. – № 1. – S. 22–32.

2. Shtuntsayger, I.Ye. Prakticheskiy opyt ustroystva statsionarnykh avtomatizirovannykh sistem monito-ringa stroitel'nykh konstruktsiy na olimpiyskikh ob'yektakh v gorode Sochi [Tekst] / I. Ye. Shtuntsayger, A. S. Denisova, A. I. Kugachev i dr. // Stroitel'stv i rekonstruktsiya. – 2015. – № 4. – S. 67–71.

3. FGKU «UVGCH v stroitel'stve» [Elektronnyy resurs] // Sajt Federal'nogo gosudarstvennogo kazen-nogo uchrezhdeniya «Upravleniye voyenizirovannykh gornospasatel'nykh chastej v stroitel'stve». – URL: <http://www.uvgch.ru>.

4. Basagni, S. Mobile Ad Hoc Networking / S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, I. Stojmenovic – IEEE Press, 2004. – 461 p.
5. Konstantinov, I. S. Imitatsionnaya model' peredachi informatsionnykh potokov v mobil'noy radiose-ti spetsial'nogo naznacheniya [Tekst] / I. S. Konstantinov, K. A. Pol'shchikov, S. A. Lazarev // Nauchnyye vedomosti BelGU. – 2015. – № 13 (210). – Vyp. 35(1). – S. 156–163.
6. Pol'shchikov, K. A. Problemnyye voprosy dostavki dannykh v mobil'noy radiosetи spetsial'nogo naznacheniya [Tekst] / K. A. Pol'shchikov // Elektrosvyaz'. – 2015. – № 7. – S. 26–29.
7. Polshchikov, K. O. Synthesis of neuro-fuzzy systems of data flows intensity control in mobile ad-hoc network / K. O. Polshchikov // Proc. of 23rd International Crimean Conference «Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo)». – Sevastopol, 2013. – P. 517–518.
8. Mnogofunktional'naya mobil'naya samoorganizuyushchayasya set' «MSR-Set» MANET 2,4 GGts [Elektronnyy resurs] // Torgovyy portal predpriyatiy rossiyskoy promyshlennosti. – URL: [http://www.rospromtorg.ru/catalog/section.php?SECTION\\_ID=34&ELEMENT\\_ID=5448&ORG=1526](http://www.rospromtorg.ru/catalog/section.php?SECTION_ID=34&ELEMENT_ID=5448&ORG=1526).
9. Anjum, S. S. Survey on MANET Based Communication Scenarios for Search and Rescue Operations / S. S. Anjum, R. M. Noor, M. H. Anisi // Proc. of 5th International Conference «IT Convergence and Security (ICITCS)». – Kuala Lumpur, 2015. – P. 1–5.
10. Verma, H. MANET based emergency communication system for natural disasters / H. Verma, N. Chauhan // Proc. of International Conference «Computing, Communications & Automation (ICCCA)». – Noida, 2015. – P. 480–485.
11. Cheong, S. H. Lifeline: Emergency Ad Hoc Network / S. H. Cheong, K. I. Lee, Y. W. Si, L. H. U // Proc. of 7th International Conference «Computational Intelligence and Security (CIS)». – Hainan, 2011. – P. 283–289.
12. Gorban', YU. Pozharnyye roboty v sovremennykh tekhnologiyakh avtomaticheskogo pozharotusheniya [Elektronnyy resurs] / YU. Gorban', Ye. Sinel'nikova // Internet-portal po bezopasnosti. – URL: [http://secandsafe.ru/stati/pojarnaya\\_bezopasnost/pojarnye\\_roboty\\_v\\_sovremennyh\\_tekhnologiyah\\_avtomaticheskogo\\_pojarotusheniya](http://secandsafe.ru/stati/pojarnaya_bezopasnost/pojarnye_roboty_v_sovremennyh_tekhnologiyah_avtomaticheskogo_pojarotusheniya).
13. Robotizirovannaya pozharnaya ustavok «Pelikan» [Elektronnyy resurs] // Ofitsial'nyy sayt nauchno-proizvodstvennogo ob"yedineniya «Sibirskiy Arsenal». – URL: <http://fire-robot.ru>.
14. Mobil'nyy robototekhnicheskiy kompleks razvedki i pozharotusheniya MRK-RP [Elektronnyy resurs] // Ofitsial'nyy sayt Nauchno-issledovatel'skogo tsentra robototekhniki. – URL: <http://www.vniipo.ru/departments/nicntr.htm>.
15. Korsunskiy, V. Mobil'nyye roboty kak sredstvo distantsionnoy bor'by s pozharami [Elektronnyy resurs] / V. Korsunskiy // Internet-portal «Biznes. Online». – URL: <http://www.bl.by/a176847.php>.
16. Penders, J. A robot swarm assisting a human fire-fighter / J. Penders, L. Alboul, U. Witkowski et al. // Advanced Robotics. – 2011. – Vol. 25. – Issue 1–2. – P. 93–117.
17. Kulla, E. Real World Emergency Scenario Using MANET in Indoor Environment: Experimental Data / E. Kulla, R. Ozaki, A. Uejima, H. Shimada // Proc. of 7th International Conference «Computational Intelligence and Security (CIS)». – Blumenau, 2015. – P. 336–341.

### I. Konstantinov

Belgorod State National Research University, Belgorod  
Doctor of technical science, professor, vice-rector  
Email: [konstantinov@bsu.edu.ru](mailto:konstantinov@bsu.edu.ru)

### O. Pilipenko

I.S. Turgenev Orel state university, Orel  
Doctor of technical sciences, professor, rector  
E-mail: [rector@univ-orel.ru](mailto:rector@univ-orel.ru)

### K. Polshchikov

Belgorod State National Research University, Belgorod  
Candidate of technical science, docent, associate professor of Information Systems Department  
Email: [polshchikov@bsu.edu.ru](mailto:polshchikov@bsu.edu.ru)

### O.D. Ivaschuk

Belgorod State National Research University, Belgorod  
Candidate of technical science, associate professor of Information Systems Department  
Email: [ivaschuk@bsu.edu.ru](mailto:ivaschuk@bsu.edu.ru)

ЮРЬЕВ Р.В.

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЗДАНИЯ РДЭС ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

*Рассмотрена методика оценки надежности элементов АЭС при сейсмических воздействиях, используемая при выполнении вероятностного анализа безопасности энергоблока АЭС. В качестве примера выполнен анализ надежности здания РДЭС (Резервная дизельная электростанция) типового проекта АЭС с реактором ВВЭР-1000 при сейсмических воздействиях. Из выполненного анализа видно, что отказ здания РДЭС практически невозможен в районах с сейсмичностью 6-8 баллов по шкале МСК-64. Однако если это здание будет построено на площадке с большей сейсмичностью, то возможные отказы здания РДЭС необходимо будет учесть в вероятностном анализе безопасности.*

**Ключевые слова:** оценка надежности; сейсмические воздействия; вероятностный анализ безопасности.

Параллельно с модернизацией действующих АЭС, разработкой новых проектов АЭС повышенной безопасности происходит и ужесточение требований, предъявляемых регулирующими органами к обоснованию безопасности при проектировании и эксплуатации ядерно-опасных объектов. Обязательным требованием для лицензирования проектов стало выполнение вероятностного анализа безопасности (ВАБ), основными количественными результатами которого являются оценки частоты повреждения активной зоны (ПАЗ) и частоты выброса радиоактивных веществ за пределы АЭС.

В ВАБ для внутренних исходных событий в качестве исходных событий рассматриваются отказы элементов систем нормальной эксплуатации, обеспечивающих охлаждение активной зоны, и активных элементов СБ. Строительные конструкции и пассивные элементы СБ при этом не рассматриваются, поскольку в режиме нормальной эксплуатации они обладают значительно более высокой надежностью, а потому не вносят вклад в значение частоты ПАЗ.

Однако в проектах современных АЭС совместное использование пассивных и активных систем безопасности (СБ) при наличии резервирования каналов СБ позволяет достичь значения частоты повреждения активной зоны (ПАЗ) реактора для внутренних исходных событий порядка  $10^{-7}$  -  $10^{-6}$  1/год, что уже сравнимо с вероятностью экстремальных (не учитываемых в качестве базовых условий проектирования) внешних воздействий, которые могут вызвать отказы строительных конструкций и пассивных элементов СБ. Поэтому возникает необходимость учитывать их надежность и влияние на безопасность АЭС.

Очевидно, что надежность строительных конструкций и пассивных элементов СБ, главным образом, будет определяться их устойчивостью к нагрузкам, вызываемым внешними воздействиями, из которых наиболее опасными являются сейсмические воздействия. В настоящей статье в качестве примера выполнен анализ сейсмической повреждаемости здания РДЭС (Резервная дизельная электростанция) типового проекта АЭС с реактором ВВЭР-1000.

При выполнении ВАБ для сейсмических воздействий используется понятие «сейсмическая повреждаемость» элемента, под которым понимается условная вероятность отказа элемента АЭС при достижении параметром движения грунта на свободной поверхности определенного значения. Зависимость «сейсмической повреждаемости» от величины указанного параметра называется «кривой сейсмической повреждаемости».

Обзор современных подходов по оценке «сейсмической повреждаемости» строительных конструкций и оборудования АЭС приведен в Сборнике трудов АЭП [1]. Анализ «сейсмической повреждаемости» здания РДЭС был выполнен с использованием вероятностного подхода, основные положения которого приведены ниже.

Пиковое горизонтальное ускорение на открытой поверхности грунта, при котором имеет место отказ здания РДЭС представляется в виде логарифмически нормально распределенной случайной величины  $\tilde{A}$  :

$$\tilde{A} = A_m \times \epsilon_R \times \epsilon_U,$$

где  $A_m$  - медианное значение случайной величины  $\tilde{A}$  ;

$\epsilon_U, \epsilon_R$  - логарифмически нормально-распределенные случайные величины с единичной медианой и логарифмическими стандартными отклонениями  $b_U, b_R$ . Эти случайные величин позволяют учесть разброс вследствие влияния различных факторов.

$\epsilon_R$  - случайная величина, которая отражает случайный разброс внутренне присущий рассматриваемым явлениям, который существует всегда и не может быть исключен при получении о них дополнительной информации (разброс значений механических характеристик, разброс амплитудных и фазовых характеристик случайного процесса - землетрясения и т.п.);

$\epsilon_U$  - случайная величина – неопределенность определения медианы вследствие недостаточного уровня изученности рассматриваемого фактора (методики расчета реакции, отклонения реальных геометрических и инерционных характеристик модели от проектных характеристик), отражает разброс, который может быть уменьшен путем проведения дополнительных исследований.

Для определения характеристик «сейсмической повреждаемости»  $A_m, b_U$  и  $b_R$  используются соотношения:

$$A_m = F_m \times A_{SSE}, \quad b_U = \sqrt{\sum_{i=1}^n \epsilon_{U_i}^2}, \quad b_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \epsilon_{R_i}^2},$$

где  $F_m$  - медианное значение коэффициента запаса  $\tilde{F}$ , определяющего во сколько раз ускорение  $\tilde{A}$  будет превосходить ускорение  $A_{SSE}$  - пиковое ускорение расчетного землетрясения за которое обычно принимается сейсмическое воздействие, определяемое по средней кривой сейсмического риска для частоты повторения  $10^{-4}$  1/год:

$$\tilde{A} = \tilde{F} \times A_{SSE}.$$

Для зданий и сооружений коэффициент запаса представляется как произведение случайных величин:

$$\tilde{F} = \tilde{F}_C \times \tilde{F}_{RS},$$

где  $\tilde{F}_C$  – коэффициент запаса по несущей способности, который разбивается на два сомножителя:

$$\tilde{F}_C = \tilde{F}_m \times \tilde{F}_s,$$

где  $\tilde{F}_m$  – коэффициент, который учитывает снижение нагрузки за счет рассеяния энергии за пределами упругости;

$\tilde{F}_s$  – представляет собой отношение несущей способности (при которой происходит потеря возможности выполнять свои функции) к напряжениям, вычисленным при расчетном землетрясении:

$$\tilde{F}_s = \frac{\tilde{S} - \tilde{P}_N}{\tilde{P}_T - \tilde{P}_N},$$

где  $\tilde{S}$  – несущая способность рассматриваемого элемента в отношении рассматриваемого вида отказа;

$\tilde{P}_N$  – реакция в элементе от эксплуатационной нагрузки (НЭ);

$\tilde{P}_T$  – суммарная реакция в элементе при расчетном землетрясении (сейсмическое воздействие + НЭ).

Коэффициент  $\tilde{F}_{RS}$  – коэффициент реакции конструкции, учитывает консервативность реакции конструкции, полученной в результате детерминистических расчетов. Часто он представляется в виде произведения коэффициентов, характеризующих влияние на реакцию конструкции неопределенности параметров, принятых в расчетах консервативно (например, отличие реального демпфирования конструкций от принятого, взаимодействие с грунтовым основанием и т.д.).

Таким образом, анализ «сейсмической повреждаемости» сводится к решению двух отдельных задач: 1) определение расчетного сейсмического воздействия и ускорения  $A_{SSE}$ , и 2) определение коэффициентов, на которые разбивается коэффициента запаса  $\tilde{F}$ .

Решение первой задачи в настоящей статье не рассматривается, поскольку оно является предметом отдельного исследования, включающего сейсмотектоническую модель района площадки размещения АЭС. В результате вероятностного анализа сейсмичности площадки были получены акселерограммы горизонтальных и вертикальных компонент сейсмического воздействия в уровне фундаментной плиты для частоты повторения  $10^{-4}$  1/год и квантили 50%. При генерации акселерограмм использовались медианные значения характеристик грунтов основания. Пиковое горизонтальное ускорение на свободной поверхности составило 0,1g. Акселерограммы приведены на рисунке 1.

Для решения второй задачи за основу была принята методика оценки «сейсмической повреждаемости» элементов изложенная в EPRI [2]. Процедура определения коэффициента запаса по несущей способности здания  $\tilde{F}_C$  требует решения следующих задач:

1. Определение реакции здания на сейсмическое воздействие.
2. Выявление потенциальных сейсмических видов отказов.
3. Определение несущей способности конструктивных элементов здания для каждого вида отказа.
4. Определение коэффициента  $\tilde{F}_m$ .

Для определения реакции здания РДЭС при сейсмических воздействиях в ПК ABAQUS была разработана расчетная конечно-элементная динамическая модель здания, учитывающая совместную работу здания и грунтового основания.

Здание РДЭС представляет собой жесткую конструкцию из сборно-монолитного железобетона запроектированную на восприятие сейсмических воздействий и воздействий от внешней воздушной ударной волны. Пространственная жесткость зданий обеспечивается жестким соединением наружных и внутренних стен с перекрытиями, покрытием и фундаментной плитой. Размер здания РДЭС в плане составляет 18,00 м × 27,00 м. Стены, перекрытия и покрытия выполнены с применением унифицированных сборных железобетонных блок ячеек для стен и ребристых и плоских плит для перекрытий и покрытий. В местах, где применение сборных конструкций невозможно, конструкции выполнялись в монолите. Бетонирование стен, плит перекрытий и покрытий, монолитных участков выполнялось из бетона марки М200. Все несущие элементы армировались сварными каркасами, сетками и отдельными стержнями из арматуры класса А-III. Толщина наружных стен – 900 мм, внутренних – 200, 300, 400, 600 мм. Толщина фундаментной плиты – 700 мм, плит перекрытий – 540 мм, покрытий – 900 мм. Пространственная схема здания РДЭС с оборудованием приведена на рисунке 2.

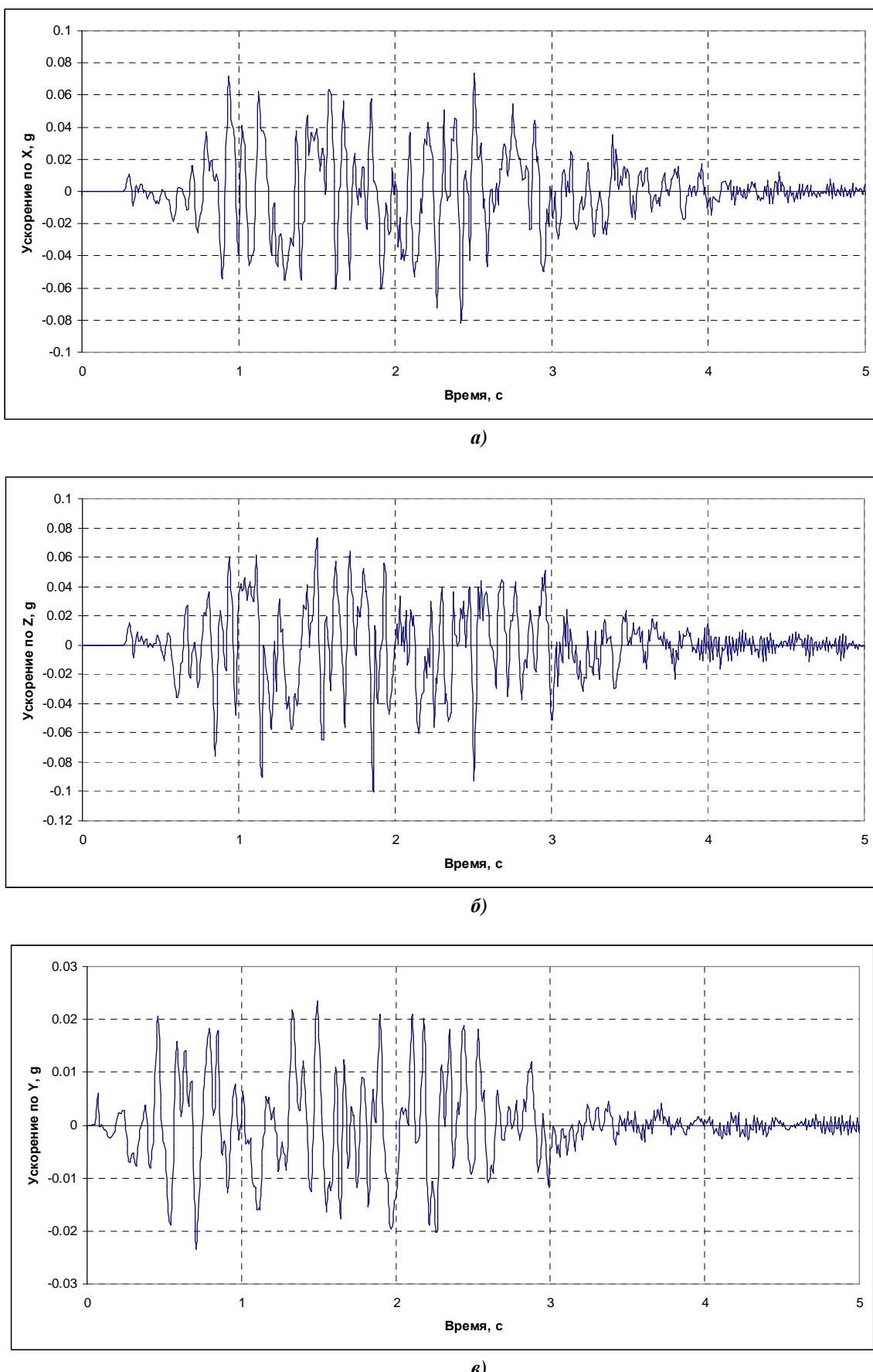


Рисунок 1 – Акселерограммы сейсмического воздействия: а) и б) – горизонтальные компоненты, в) – вертикальная компонента

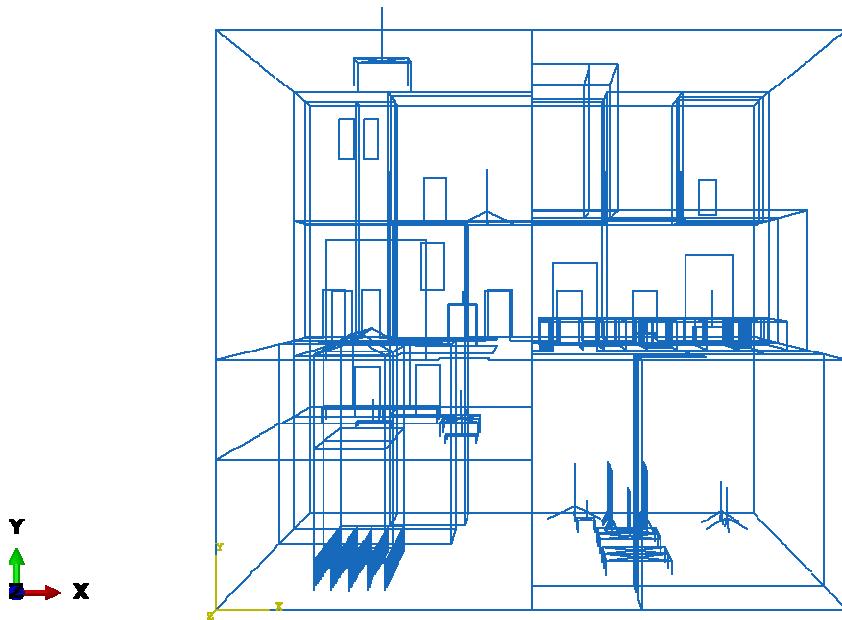


Рисунок 2 – Пространственная схема здания РДЭС

Расчет выполнялся во временной области методом модальной суперпозиции. При определении реакции здания использовались медианные значения всех параметров, входящих в динамическую модель здания (массы, жесткости конструкций и грунтов). Демпфирование согласно рекомендациям [2] назначалось 7% от критического.

В отчете [2] приводятся результаты экспериментов с консольными железобетонными стенками, нагруженными сдвигающей силой вдоль свободной грани. Экспериментально установлено что, для «коротких» стен (с отношением высоты к длине  $> 1$ ) величина предельного относительного смещения лежит в диапазоне от 1% до 3%, для «протяженных» стен (с отношением высоты к длине  $< 1$ ) – от 0,5% до 1%. Поэтому для оценки повреждаемости зданий могут быть приняты деформационные критерии отказа, основанные на значениях предельного относительного междуэтажного смещения, например, отказ здания происходит, когда относительное междуэтажное смещение достигает значения порядка 1% от высоты этажа.

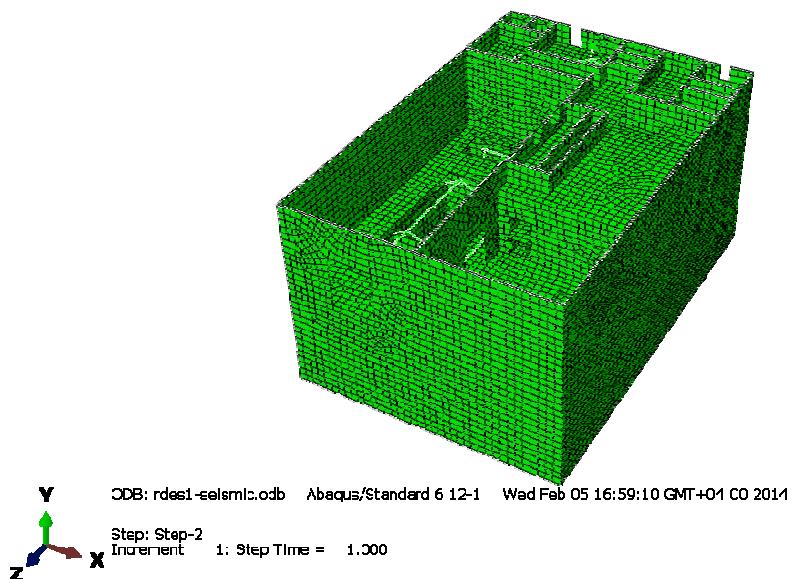


Рисунок 3 – Расчетная модель здания РДЭС (фрагмент до отм.7,000)

В таблице 1 приведены медианные значения относительного междуэтажного смещения, рекомендуемые в отчете [2] для зданий и сооружений АЭС.

Таблица 1 – Медианные и логарифмические стандартные отклонения значений предельных междуэтажных смещений

Тип конструкции	Медианное значение предельного относительного междуэтажного смещения, %	$\beta_R$	$\beta_U$
Стены - крепление оборудования систем безопасности и важных для безопасности	0,5	0,15	0,3
Стены - крепление оборудования систем не важных для безопасности	0,7	0,15	0,3
Защитная оболочка	0,75	0,15	0,3

Потенциальным сейсмическим видом отказа для железобетонных зданий со стеновой конструктивной системой может являться образование диагональных трещин в стенах в результате действия сдвигающих сил, действующих в плоскости стен, что приводит к нарушению крепления оборудования и трубопроводов. Отказ крепления оборудования и трубопроводов СБ может привести к отказу СБ, т.е. отказу проектных функций здания при отсутствии его обрушения. Поэтому в расчете принято, что отказ здания РДЭС наступает при достижении медианного значения относительного междуэтажного смещения 0,5%, для которого  $b_R = 0,15$ ,  $b_U = 0,3$ .

Для рассматриваемого здания можно условно выделить два этажа: 1-й этаж с отм. -7,000 до отм. 0,000; 2-й этаж с отм. 0,000 до отм. 9,600. Поскольку 2-й этаж имеет большую высоту, то относительные смещения рассматривались между плитами перекрытий на отм. 0,000 и отм. 9,600. На рисунке 4 приведен график относительных смещений вдоль направлений X и Z, из которого видно, что смещения в обоих направлениях максимальны в момент времени  $t = 2,17$  с, а максимальное значение относительного смещения составляет 0,00033 м и направлено вдоль оси X.

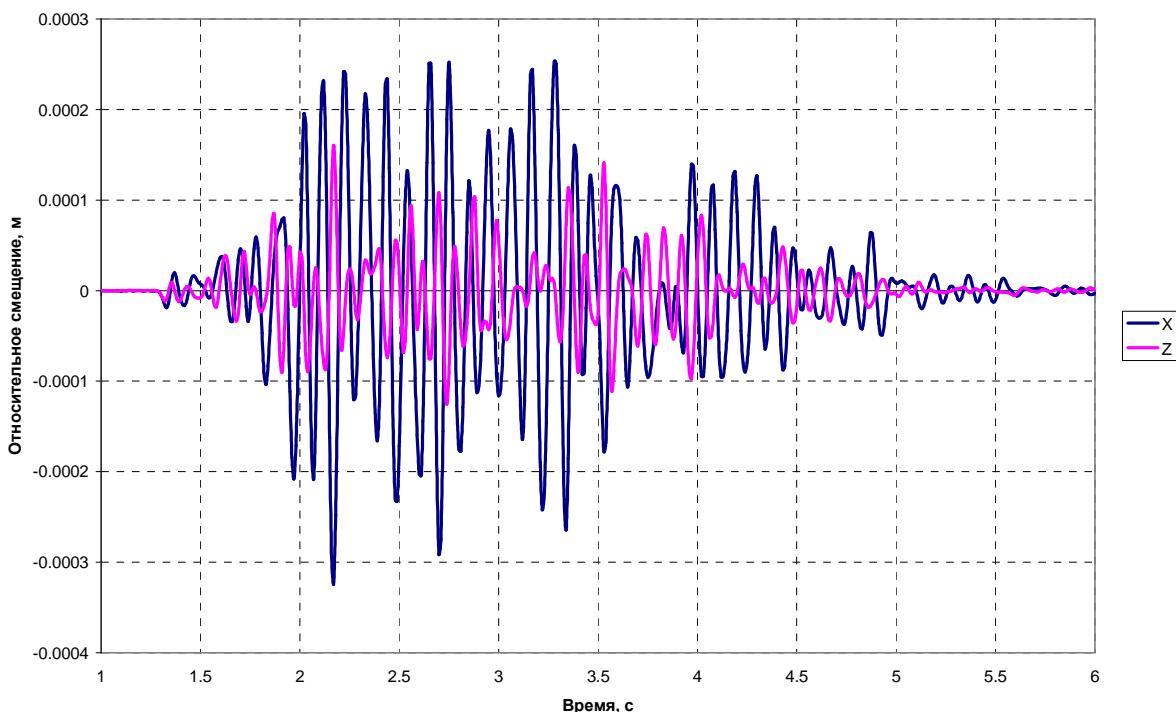


Рисунок 4 – График относительных междуэтажных смещений вдоль направлений X и Z

Максимальное значение относительного смещения 0,00033 м получено в линейной постановке, а принятое предельное значение относительного междуэтажного смещения 0,5% соответствует нелинейно-деформированному состоянию железобетонных стен (с образованием диагональных трещин). Поэтому для определения медианного значение коэффициента  $\tilde{F}_S$ , предварительно необходимо определить предельное упругое междуэтажное смещение, которому соответствует сдвигающая сила, вызывающая относительное междуэтажное смещение 0,5% при учете нелинейной работы железобетона стен. Если считать, что предельное междуэтажное смещение главным образом происходит за счет раскрытия диагональных трещин, т.е. растяжения арматуры стен, то консервативно упругое междуэтажное предельное смещение

будет в  $k = \frac{E_b}{E_s \varphi}$  раз меньше (здесь  $\varphi$  – процент армирования стен). Поскольку здание РДЭС

было запроектировано на действие ВУВ с давлением на фронте 30 кПа, то принимаем  $\varphi = 1\%$ , тогда:

$$k = \frac{24000}{200000 \times 0,001} = 12.$$

Принимая, что медианное значение и значения логарифмических стандартных отклонений относительного междуэтажного смещения от нагрузок нормальной эксплуатации очень малы ( $\approx 0$ ):

$$F_{S_m} = \frac{0,005/12}{0,00033/9,6} = 12,1, \quad b_r = 0,15, \quad b_u = 0,3.$$

Медианное значение коэффициента  $\tilde{F}_m$  можно принять согласно стандарту DOE [3] равным  $F_m = 1,5$ . Оценку логарифмических стандартных отклонений выполним по рекомендациям [2]:

$$b_r = 0,4 \times [0,06 + 0,03 \times (1,5 - 1)] = 0,03, \quad b_u = 0,2 \times (1,5 - 1) = 0,1.$$

Коэффициент реакции  $\tilde{F}_{RS}$  можно представить в виде произведения соответствующих коэффициентов:

$$\tilde{F}_{RS} = \tilde{F}_d > \tilde{F}_M > \tilde{F}_{SSI},$$

где  $\tilde{F}_d$  – коэффициент различия в демпфировании, учитывающий погрешности в представлении реального демпфирования принятым в расчете демпфированием (учтен при назначении демпфирования);

$\tilde{F}_M$  – коэффициент, учитывающий отклонения и неопределенность моделирования (учтены путем использования пространственной КЭ модели здания);

$\tilde{F}_{SSI}$  – коэффициент, учитывающий эффекты взаимодействия грунт-сооружение, включая снижение интенсивности воздействия с глубиной относительно земной поверхности (учтены в расчетной модели, расчет жесткости пружин и демпферов выполнялся с учетом эффектов взаимодействия сооружения и основания).

Тогда для указанных коэффициентов, согласно [2], можно принять медианное значение равным единице и стандартные отклонения  $b_r = 0$ ,  $b_u = 0,05$ .

Определим медианное значение и логарифмические стандартные отклонения для пикового горизонтального ускорения на открытой поверхности грунта, при котором имеет место отказ здания РДЭС:

$$A_m = F_m \times A_{SSE} = 12,1 \times 1,5 \times 0,1g = 1,82g,$$

$$b_r = \sqrt{\sum_{i=1}^n b_{R_i}^2} = \sqrt{0,15^2 + 0,03^2} = 0,153,$$

$$b_u = \sqrt{\sum_{i=1}^n b_{U_i}^2} = \sqrt{0,3^2 + 0,1^2 + 0,05^2 + 0,05^2 + 0,05^2} = 0,328 .$$

Набор кривых сейсмической повреждаемости для доверительной вероятности  $Q$  может быть получен по формуле:

$$f(a) = \frac{\frac{1}{\sigma} \frac{a - \mu}{\sigma} + b_u \Phi^{-1}(Q)}{b_R}, \quad (1)$$

где  $\Phi$  и  $\Phi^{-1}$  - прямая и обратная стандартные функции нормального распределения.

На рисунке 5 приведен набор кривых условной вероятности отказа здания РДЭС построенных для уровней доверительной вероятности 5%, 50% и 95%.

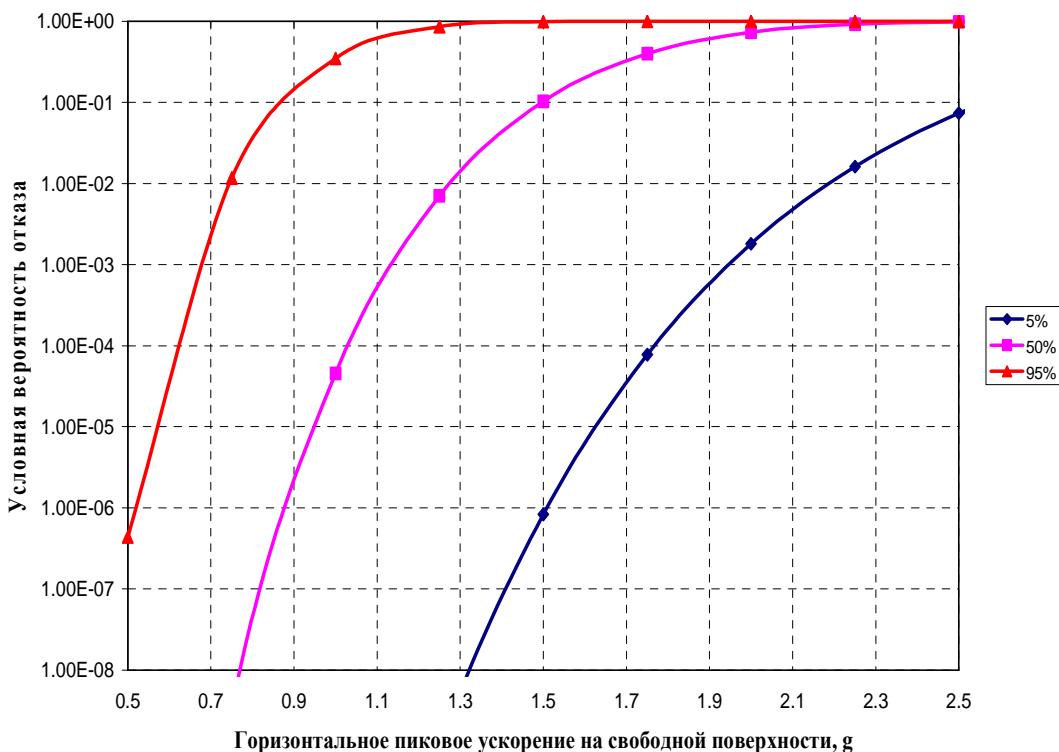


Рисунок 5 – Кривые сейсмической повреждаемости здания РДЭС

При выполнении ВАБ для сейсмических воздействий для скрининга элементов используется ускорение  $HCLPF$ , соответствующее так называемому уровню высокой уверенности в низкой вероятности отказа. Пиковому ускорению  $HCLPF$  на свободной поверхности соответствует значение условной вероятности отказа 0,05 на кривой 95% доверительной вероятности:

$$HCLPF = A_m \times e^{(-1.64(b_R + b_u))} = 1,82g \times e^{-1.64(0.153+0.328)} = 0,83g .$$

Можно видеть, что ускорение  $HCLPF$  на свободной поверхности соответствует значению условной вероятности отказа 0,01 на так называемой композитной кривой или, как часто ее называют, кривой наилучшей оценки, которая получается заменой в формуле (1)  $b_u$  на 0,  $b_R$  на  $\sqrt{b_u^2 + b_R^2}$ .

Из выполненного анализа видно, что отказ здания РДЭС практически невозможен в районах с сейсмичностью 6-8 баллов по шкале МСК-64. Однако если это здание будет построено на площадке с большей сейсмичностью, например, площадка АЭС «Аккую», то возможные отказы здания РДЭС необходимо будет учесть в ВАБ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинкин, И.В. Оценка сейсмостойкости АЭС методами ВАБ [Текст] / И.В. Калинкин, Р.В. Юрьев // Сборник трудов ОАО «Атомэнергопроект». – М.: ОАО «Атомэнергопроект», 2013. – Вып. 13 – 142 с.
2. EPRI TR-103959 «A methodology for developing seismic fragilities». Final Report, Electric Power Research Institute, June 1994.
3. DOE-STD-1020-2002. DOE Standard Natural Phenomena Hazards Design and evaluation criteria for department of energy facilities. January 2002.

**Р.В. Юрьев**

ФГБОУ ВО "НИУ МГСУ", г. Москва

Кандидат технических наук, научный сотрудник

научно-исследовательской лаборатории «Надежность и сейсмостойкость сооружений»

E-mail: [yurev\\_roman@mail.ru](mailto:yurev_roman@mail.ru)

---

R. YURIEV

## ASSESSMENT OF RELIABILITY OF DIESEL GENERATING STANDBY ELECTRIC POWER STATION UNDER SEISMIC LOADS

*Methodology for seismic reliability assessment of NPP components, application in probabilistic safety analyses, is considered. As example reliability analysis of DGS building (diesel generator station) of standard NPP with WWER 1000 reactor is presented. From the conducted analysis it is evident that the refusal of the building Diesel generating standby electric power station is virtually impossible in areas with seismicity 6-8 points on a scale MSK-64. However, if the building will be constructed at the site with higher seismic activity, the possible failures of the building Diesel generating standby electric power station would need to be considered in probabilistic safety analysis.*

**Key words:** reliability assessment; seismic events; probabilistic safety analysis.

## BIBLIOGRAPHY

1. Kalinkin, I.V. Otsenka seysmostoykosti AES metodami VAB [Tekst] / I.V. Kalinkin, R.V. Yuriev // Sbornik trudov OAO «Atomenergoprojekt». – M.: OAO «Atomenergoprojekt», 2013. – Vyp. 13 – 142 s.
2. EPRI TR-103959 «A methodology for developing seismic fragilities». Final Report, Electric Power Research Institute, June 1994.
3. DOE-STD-1020-2002. DOE Standard Natural Phenomena Hazards Design and evaluation criteria for department of energy facilities. January 2002.

**R. Yuriev**

Moscow state university of civil engineering, Moscow.

Candidate of technical Sciences,

researcher of laboratory "Reliability and seismic stability of structures"

E-mail: [yurev\\_roman@mail.ru](mailto:yurev_roman@mail.ru)

УДК 681.3.063

ИВАЩУК О.А., ЩЕРБИНИНА Н.В., ФЕДОРОВ В.И.

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ<sup>‡</sup>**

*Авторами представлены результаты разработки и применения метода и алгоритмов восстановления изображений земной поверхности по спутниковым снимкам высокого разрешения. Данный метод существенно повышает визуальные характеристики качества (резкость, четкость, контраст) спутниковых снимков, что расширяет спектр их применения при решении таких задач, как планирование застройки территории, возведение и реконструкция строительных объектов различного назначения, организация эффективного функционирования их инженерной инфраструктуры, решение вопросов земельного кадастра, обеспечение техносферной безопасности с одновременным повышением эффективности процесса принятия решений.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, цифровое космическое изображение, пространственно-частотный спектр, функция рассеяния точки.

#### **Введение**

Применение космических средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) не только обеспечивает возможность эффективного мониторинга окружающей среды и получения новых знаний о Земле. Сегодня спутниковые снимки оптического диапазона становятся незаменимым средством информационного обеспечения принятия управлеченческих решений при реализации широкого спектра практических задач, таких как планирование застройки территории, возведение и реконструкция строительных объектов различного назначения (промышленных, транспортных, жилых, военных, гидротехнических, сельскохозяйственных и др.), организация эффективного функционирования их инженерной инфраструктуры (энерго-, тепло-, водоснабжения и т.п.), решение вопросов земельного кадастра, обеспечение техносферной безопасности [1, 2, 3, 4, 5].

При этом повышение качества получаемых данных тракта ДЗЗ, определяющего степень их достоверности приобретает первостепенное значение и требует совершенствования методов формирования и обработки спутниковых изображений. Интерпретация спутниковых снимков, в связи с имеющимися частотно-шумовыми искажениями, вносимыми атмосферой (прежде всего ее аэрозольными составляющими), самой оптической системой, приемником изображения и др., сопровождается существенными проблемами, связанными с подавлением высокочастотных составляющих на изображениях [6,7,8]. В результате ухудшаются визуальные характеристики их качества: резкость, четкость, контраст.

Улучшение параметров спутниковых изображений было бы возможным путем изготовления ПЗС-матриц с большим числом фотоприемных элементов и создания на их основе новых оптоэлектронных приборов. Однако подобный подход на сегодняшний день является практически не реализуемым в связи с существующими технологическими проблемами. Таким образом, основными направлениями обработки изображений объектов, расположенных на данной земной поверхности, по спутниковым снимкам являются цифровые методы

<sup>‡</sup> Работа выполнена в рамках исполнения проекта РФФИ №15-48-03163 «Создание и исследование технологии и прототипа системы интеллектуального экомониторинга, прогнозирования и ситуационного управления биотехносферой сельско-городских территорий»

[9,10,11,12]. Наибольшую известность получил метод регуляризации задач восстановления Тихонова А.Н. [13,14,15], который, однако, также не позволяет восстановить высокочастотные компоненты и получить результирующее изображение с достаточным уровнем резкости.

### Основная часть

Математической моделью формирования изображения является известное интегральное соотношение Фредгольма [16]:

$$u(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x - t, y - t) f(t, t) dt dt + v(x, y), \quad (1)$$

где  $(x, y)$  – координаты точки (пикселя) на регистрируемом изображении  $u(x, y)$ ;  $f(t, t)$  – интенсивность отражений земной поверхности;  $h(x - t, y - t)$  – так называемая функция рассеяния точки (ФРТ), которая является основной характеристикой, описывающей передачу структуры объекта оптической системой со сглаживающим эффектом;  $v(x, y)$  – внешние шумовые воздействия (помехи).

Для восстановления изображений (т.е. компенсации действия ФРТ на изображениях) решается обратная некорректная задача: вычисление  $f$  по данным  $u$ . Она рассматривалась в работах многих ученых, в результате чего появилось достаточно много методов и алгоритмов регуляризации задачи восстановления. Наиболее часто используется оператор восстановления Тихонова А.Н., который имеет вид [13,14,15]:

$$\hat{f}(t, \tau) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{H^*(\omega_x, \omega_y) U(\omega_x, \omega_y)}{|H(\omega_x, \omega_y)|^2 + \gamma(\omega_x^2 + \omega_y^2)^{1/2}} e^{j\omega_x t} e^{j\omega_y \tau} d\omega_x d\omega_y, \quad (2)$$

где  $U(\omega_x, \omega_y)$  – спектр регистрируемого изображения;  $\gamma$  – параметр регуляризации;  $\omega = 2\pi n$ ;  $n$  – пространственная частота;  $j = (-1)^{1/2}$ ;  $H(\omega_1, \omega_2)$  – частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) системы (звездочка означает комплексное сопряжение), определяемая как

$$H(\omega_x, \omega_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y) e^{-j\omega_x x} e^{-j\omega_y y} dx dy. \quad (3)$$

Ввиду достаточно быстрого спада спектра ФРТ в области высоких частот (и соответствующего спада ЧКХ) происходит подавление или полное уничтожение в этой спектральной полосе мелких деталей на формируемом изображении. Это, в частности, не позволяет достичь достаточной резкости снимков. Существующие методы восстановления, включая метод Тихонова А.Н., не позволяют решить эту проблему.

Одним из наиболее эффективных подходов к решению задачи усиления высокочастотных компонент является применение численного дифференцирования. Однако его использование часто приводит к чрезмерно высокому уровню высокочастотных компонент в производной регистрируемого изображения (переконтрастирование).

Для решения выявленных проблем авторами разработан и исследован метод восстановления спутниковых изображений земной поверхности с одновременным повышением резкости на основе модификации метода регуляризации Тихонова, позволяющий повысить вклад высокочастотных компонент с одновременным решением проблемы переконтрастирования.

Для обеспечения компенсации спада (коррекции) ЧКХ и соответствующего повышения резкости в работе предлагается использовать аддитивное представление восстанавливаемого изображения с применением дифференцирования

$$S_I(x, y) = S_R(x, y) + a p(S(x, y)), \quad (4)$$

где  $S_R$  – формируемое изображение;  $S_I$  – восстанавливаемое изображение,  $a > 0$  – коэффициент.

Для конструирования аддитивной добавки  $p(S(x, y))$ , позволяющей выровнять вклад высокочастотных компонент, будем использовать операцию дифференцирования нецелого порядка  $D^a(0 \leq a, b \leq 1)$ , определяемую для допускающих Фурье-представлений функций в виде:

$$D_x^a S(x, y) = \int \limits_{\mathbb{W}} (j\mathbf{W}_x)^a F_S(\mathbf{W}_x, \mathbf{W}_y) e^{j\mathbf{W}_x \cdot \mathbf{x}} d\mathbf{W}_x, \quad (5)$$

$$D_y^b S(x, y) = \int \limits_{\mathbb{W}} (j\mathbf{W}_y)^b F_S(\mathbf{W}_x, \mathbf{W}_y) e^{j\mathbf{W}_y \cdot \mathbf{y}} d\mathbf{W}_y, \quad (6)$$

где  $F_S(\mathbf{W}_x, \mathbf{W}_y)$  – преобразование Фурье.

Формируемая аддитивная добавка  $p$  по сути является оценкой псевдоградиентного вектора  $\text{grad}_{ab}(D_x^a S(x, y), D_y^b S(x, y))$

$$p(S(x, y)) = \text{grad}_{ab}((D_x^a S)^2 + (D_y^b S)^2)^{1/2}. \quad (7)$$

Для эффективной реализации данного подхода возникает задача выбора параметров  $a$  и  $a$ . пределим следующие условия выбора параметров  $a$  и  $a$ :

- максимизация функционала – объема под огибающей поверхностью ЧКХ

$$\hat{\mathbf{a}} \int \limits_{i,j}^{N,M} H(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j) d\mathbf{W}_i d\mathbf{W}_j = \hat{\mathbf{a}} \int \limits_{i,j}^{N,M} F(S_R)/F(S_I) d\mathbf{W}_i d\mathbf{W}_j = R_1 = \max, \quad (9)$$

где  $M$  и  $N$  – размеры (в отсчетах) спектрального окна задачи,  $d\mathbf{W}_i, d\mathbf{W}_j$  – приращения значений частот;  $i$  и  $j$  нумеруют дискретные отсчеты на осях  $\mathbf{W}_x, \mathbf{W}_y$ .

- квазигладкость огибающей поверхности ЧКХ и ее параллельность координатной плоскости, что соответствует вычислению среднего значения

$$\overline{\text{grad}_{ab} H(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j)} = R_2 = \min \text{ при } w < w_2; \quad (10)$$

- обеспечение устойчивого спада огибающей ЧКХ, начиная с некоторой моды  $w_2$  с минимизацией разницы  $\mathbf{W}_e - \mathbf{W}_2$  ( $\mathbf{W}_e$  – наибольшая частота спутника)

$$\text{grad}_{ab} H(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j) = R_3 < 0 \text{ при } w > w_2; \quad \mathbf{W}_e - \mathbf{W}_2 = R_4 = \min. \quad (11)$$

Из (9) и (10) находятся  $a_1$  и  $a_1$ ; а (11) используется для коррекции их или игнорируются при априорном задании значения моды  $w_2$ .

В соответствии с вышеизложенным запишем фильтр Тихонова в виде:

$$F(S_I) = H^*(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j) F(S_I) / (|H(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j)|^2 + r(\mathbf{W}_i^2, \mathbf{W}_j^2)^{1/2}) = H_m^{-1} F(S_R). \quad (12)$$

Пусть  $H_0 = H(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j)$  при  $a = a_1$  и  $a = a_1$ .

В этом случае можно поставить задачу определения параметра  $\mathbf{E}$ , введенного для коррекции ядра восстанавливающего оператора минимизацией невязки  $R_5$  (значения функционала сравнения):

$$\hat{\mathbf{a}} \int \limits_{i,j}^{N,M} \left| H_0(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j) - (H^*(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j) / (|H(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j)|^2 + r(\mathbf{W}_i^2, \mathbf{W}_j^2)^{1/2}) + \mathbf{e})^{-1} \right|^2 = R_5^2 = \min, \quad (13)$$

при этом выражение в (13) находим как  $F(S_R) / F(S_I)$  – это ЧКХ тракта, при восстановлении изображения соотношением (12).

Если корректирующая добавка  $\mathbf{e} = n(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j)$ , то она согласует эти две ЧКХ с более высокой точностью. Перепишем регуляризованное соотношение (13) в виде

$$\left| H_0(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j) - (H^*(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j) / (|H(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j)|^2 + r(\mathbf{W}_i^2, \mathbf{W}_j^2)^{1/2}) + n(\mathbf{W}_i, \mathbf{W}_j))^{-1} \right|^2 = R_6^2 = \min. \quad (14)$$

Из него следует

$$n(w_i, w_j) = (H_0(w_i, w_j) + |R_6|^2)^{-1} - H^*(w_i, w_j) / (|H(w_i, w_j)|^2 + r(w_i^2, w_j^2)^{1/2}). \quad (15)$$

В результате получим следующее соотношение для восстановления изображения на основе модификации оператора Тихонова

$$\begin{aligned} F(S_I) &= F(S_R)(H^*(w_i, w_j) / (|H(w_i, w_j)|^2 + r(w_i^2, w_j^2)^{1/2}) + n(w_i, w_j)) = \\ &= F(S_R)(H_m^{-1} + n), \end{aligned} \quad (16)$$

т.е.

$$F(S_I) = F(S_R)(H_0(w_i, w_j) + R_6)^{-1} = F(S_R)(H_0(w_i, w_j))_{|R_6=0}^{-1}, \quad (17)$$

где  $(H_0(w_i, w_j))_{|R_6=0}^{-1}$  – это спектральное представление оператора восстановления.

Использование вышеизложенного метода позволяет реализовать процесс восстановления изображений с компенсированием сглаживающего действия ФРТ и с оценкой параметров восстанавливющего оператора, позволяющих предотвратить эффект переконтрастирования.

На рисунках 1-4 приведены результаты обработки фрагмента цифрового космического изображения (ЦКИ) участка промышленной зоны сельско-городской территории с использованием разработанного метода (а) и их пространственно-частотный спектр (ПЧС) (б).

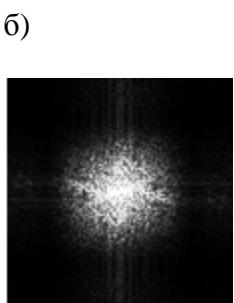


Рисунок 1 – Исходный фрагмент ЦКИ и его ПЧС:  
а) ЦКИ; б) ПЧС

Рисунок 2 – Результат свертки ЦКИ с однородной  
ФРТ размером 3x3 пикселя: а) ЦКИ; б) ПЧС

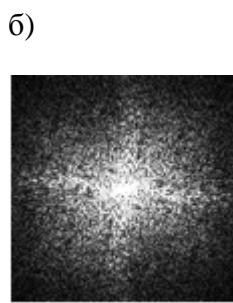


Рисунок 3 – Результат восстановления с примене-  
нием соотношения (17): а) ЦКИ; б) ПЧС

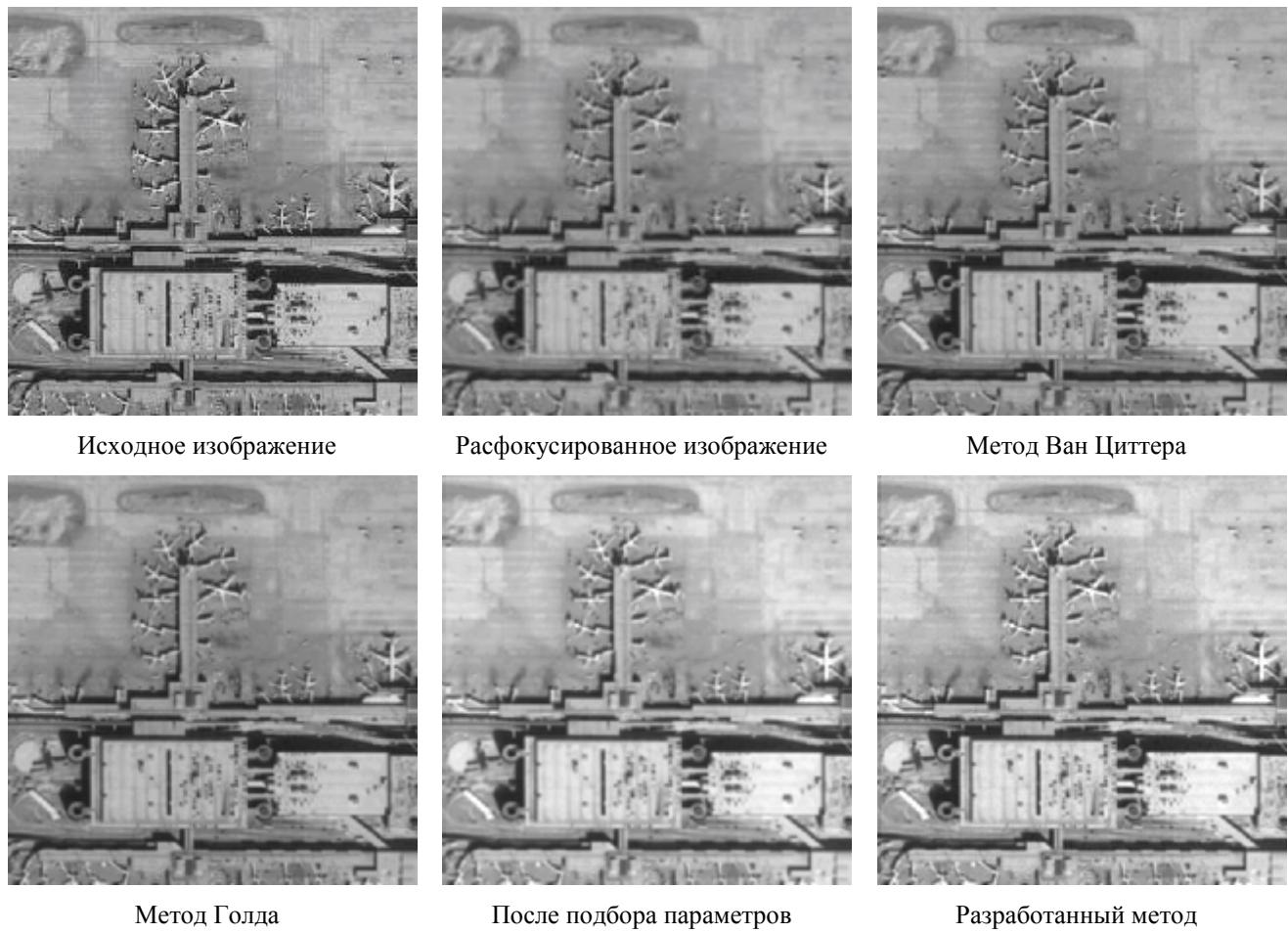
Рисунок 4 – Результат восстановления без примене-  
ния соотношения (17): а) ЦКИ; б) ПЧС

Фрагменты ЦКИ, используемые на рисунках, получены со спутника «Ресурс ДК». Вычисленные оптимальные значения  $a = 0,1$  и  $\alpha = 0,15$ .

Для практической реализации алгоритмов восстановления изображений на сельско-городских территориях разработана программная реализация (с использованием языка C# и интегрированной среды Microsoft Visual Studio), а также приведен сравнительный анализ разработанного метода с существующими методами восстановления.

Проведенный сравнительный анализ показал: разработанный метод восстановления изображений на основе модификации оператора Тихонова в среднем обеспечивает повышение уровня восстановления относительно существующих методов на 62%.

На рисунке 5 приведен пример обработки тестового изображения (загородная территория с расположенным на ней аэродромом).



*Рисунок 5 – Обработка тестового изображения.*

### Заключение

Предложен метод восстановления спутниковых изображений земной поверхности, отличительной особенностью которого является модификация оператора Тихонова за счет аддитивной добавки, которая позволяет повысить вклад высокочастотных компонент с помощью оценивания параметров компенсирования действия функции рассеяния точки непосредственно по результатам измерений с одновременным подавлением эффекта переконтрастирования.

Реализуемый в разработанном методе процесс определения конкретных параметров восстановления качества изображения позволяет составить полный паспорт для метрической аттестации измерительных свойств изображений земной поверхности.

Разработана программная реализация алгоритмов восстановления изображений, которая позволяет осуществлять практическую реализацию разработанного метода для решения задач строительства, проектирования территорий, земельного кадастра, а также экологического мониторинга, прогнозирования и управления в сфере техносферной безопасности территорий.

Результаты проведенного вычислительного эксперимента показали, что применение разработанного метода позволяет повысить резкость изображения на спутниковых снимках на 60% по сравнению с существующими методами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karini H.A. Techiques For Automated Extraction of Roadway Inventory Features From High-Resolution Satellite Imagery [Text] / H.A. Karini, X.Dai, S.Khorran, A.J. Khattack, J.E.Hummen // Geocanto Int. – 1999. - 14.-№2. - P.5-16.
2. Preliminary Analysis of Landsat-4 Thematic Mapper Products // Inter. J. of Remote Sens., L. – 1983. - V.4.-№4.-P.817-828.
3. Куссуль, Н.Н. Геопространственный анализ рисков на основе слияния данных [Текст] / Н.Н. Куссуль, Я.И. Зельк, С.В. Скакун, А.Ю. Шелестов // Сборник научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса – физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов», учреждение Российской академии наук, институт космических исследований РАН, 2010. – 2010. – Т.7. – № 2. – С. 55-66.
4. El-Mowafy A. Integrated Use of GPS and GLONASS in Support of the Redesign of Road Networks [Text] /A. El-Mowafy // Navig J. -2001.-54.-№1.-P.15-17.
5. Дубина, В.А. Интеграция спутниковых данных и наземных видеонаблюдений в системах мониторинга [Текст] / В.А. Дубина, В.К. Фищенко, О.Г. Константинов, Л.М. Митник // Сборник научных статей «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса – физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов», учреждение Российской академии наук, институт космических исследований РАН, 2011. – 2011. – Т.8. – № 3. – С. 214-222.
6. Fergus Robert. Removing camera shake from a single photograph [Text] / Fergus Robert, Barun Singh, Aaron Hertzmann, Sam T. Roweis, William T. Freeman. // Journal: ACM Transactions on Graphics. – 2006. – TOG. – Vol. 25. – №.3. – pp. 787-794.
7. Eric Breton, Christophe Latry. Fabrice Levy and Bernard Rouge. "Operational data processing to improve SPOT image resolution"// Proc. SPIE 4474, Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations XI, 323 (November 20, 2001); doi:10.1117/12.44486.
8. Селиванов, А.С. Субпиксельная обработка как способ повышения пространственного разрешения в системах дистанционного зондирования [Электронный ресурс] / А.С. Селиванов //ФГУП «Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения» (ФГУП «РНИИКП»). – 2008. – Режим доступа: <http://www.grc.com/ct/ctwhat.htm>.
9. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений [Текст] / Р.А. Шовенгердт. – М.: «Техносфера», 2010. – 560 с.
10. Jacobsen, K. Very highe resolution satellite images – competition to aerial images [Text] // Proc.Map World Forum, Hyderabad, India – 2010.
11. Park S. C. Super-resolution image reconstruction: A technical overview [Text] / Park S. C., Park M. K., Kang M. G. // IEEE Signal Processing Magazine. – 2003. – Vol. 20. – № 3. – P. 21–36.
12. Ращупкин, А.В. Технологии обработки видеонформации, обеспечивающие качество аэрокосмических изображений [Текст] / Ращупкин А.В. // Полет. – 2008. – № 11. – С. 42 - 48.
13. Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника [Текст] / В.И.Тихонов. – М.: Советское радио, 1966. – 677 с.
14. Остриков, В. Н. Оценка функции рассеяния точки на произвольном снимке посредством слепого восстановления [Текст] / Остриков В.Н. // Сборник трудов научно-технической конференции «Техническое зрение в системах управления 2011». – М.: ИКИ РАН, 2012. – Т.38 – С. 16-21.
15. Сизиков, В.С. Математические методы обработки результатов измерений [Текст]: учебник для вузов / Сизиков В.С. – СПб: Изд-во «Политехника», 2001. – 239 с.
16. Бейтс, Р. Восстановление и реконструкция изображений [Текст] / Р. Бейтс, М. Мак-Доннел. – М.: Мир, 1989 – 336 с.

**Иващук Ольга Александровна**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород  
Доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем  
E-mail: [olga.ivashuk@mail.ru](mailto:olga.ivashuk@mail.ru)

**Щербинина Наталья Владимировна**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород  
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационных систем

**Федоров Вячеслав Игоревич**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород  
аспирант  
Email: [fedorov\\_v@bsu.edu.ru](mailto:fedorov_v@bsu.edu.ru)

## IMPROVING MANAGEMENT EFFECTIVENESS OF TECHNOSPHERE SAFETY OF TERRITORIES ON THE BASIS OF IMPROVING THE QUALITY OF SATELLITE IMAGES OF THE EARTH'S SURFACE

*Authors provided results of development and application of a method and algorithms of recovery of images of an earth surface on satellite pictures of high resolution. This method significantly raises visual characteristics of quality (sharpness, definition, contrast) of satellite pictures that expands a range of their application in case of the solution of tasks, such as planning of building of the territory, exponentiation and reconstruction of construction objects of different function, the organization of effective functioning of their engineering infrastructure, the solution of questions of the land registry, support of a technosphere safety with simultaneous increase of efficiency of decision-making process.*

**Keywords:** remote sensing of Earth, digital space image, the spatial-frequency range, function of dispersion of a point.

### BIBLIOGRAPHY

1. Karini H.A. Techiques For Automated Extraction of Roadway Inventory Features From High-Resolution Satellite Imagery [Text] / H.A. Karini, X.Dai, S.Khorran, A.J. Khattack, J.E.Hummen // Geocanto Int. – 1999. - 14.-№2. - P.5-16.
2. Preliminary Analysis of Landsat-4 Thematic Mapper Products // Inter. J. of Remote Sens., L. – 1983. - V.4.-№4.-P.817-828.
3. Kussul', N.N. Geoprostranstvennyy analiz riskov na osnove sliyaniya dannykh [Tekst] / N.N. Kussul', YA.I. Zelyk, S.V. Skakun, A.YU. Shelestov // Sbornik nauchnykh statey «Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya iz kosmosa – fizicheskiye osnovy, metody i tekhnologii monitoringa okruzhayushchey sredy, potentsial'no opasnykh yavleniy i ob"yektor», uchrezhdeniye Rossiyskoy akademii nauk, institut kosmicheskikh issledovaniy RAN, 2010. – 2010. – T.7. – № 2.– S. 55-66.
4. El-Mowafy A. Integrated Use of GPS and GLONASS in Support of the Redesign of Road Networks [Text] /A. El-Mowafy // Navig J. -2001.-54.-№1.-P.15-17.
5. Dubina, V.A. Integratsiya sputnikovykh dannykh i nazemnykh videonablyudeniy v sistemakh monitoringa [Tekst] / V.A. Dubina, V.K. Fishchenko, O.G. Konstantinov, L.M. Mitnik // Sbornik nauchnykh statey «Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya iz kosmosa – fizicheskiye osnovy, metody i tekhnologii monitoringa okruzhayushchey sredy, potentsial'no opasnykh yavleniy i ob"yektor», uchrezhdeniye Rossiyskoy akademii nauk, insti-tut kosmicheskikh issledovaniy RAN, 2011. – 2011. – T.8. – № 3. – S. 214-222.
6. Fergus Robert. Removing camera shake from a single photograph [Text] / Fergus Robert, Barun Singh, Aaron Hertzmann, Sam T. Roweis, William T. Freeman. // Journal: ACM Transactions on Graphics. – 2006. – TOG. – Vol. 25. – №.3. – pp. 787-794.
7. Eric Breton, Christophe Latry. Fabrice Levy and Bernard Rouge. "Operational data processing to improve SPOT image resolution"// Proc. SPIE 4474, Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations XI, 323 (November 20, 2001); doi:10.1117/12.4486.
8. Selivanov, A.S. Subpiksel'naya obrabotka kak sposob povysheniya prostranstvennogo razresheniya v sistemakh distantsionnogo zondirovaniya [Elektronnyy resurs] / A.S. Selivanov //FGUP «Rossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut kosmicheskogo priborostroyeniya» (FGUP «RNIKP»). – 2008. – Rezhim dostupa: <http://www.grc.com/ct/ctwhat.htm>.
9. Shovengerdt, R.A. Distantsionnoye zondirovaniye. Metody i modeli obrabotki izobrazheniy [Tekst] / R.A. Shovengerdt. – M.: «Tekhnosfera», 2010. – 560 s.
10. Jacobsen, K. Very highe resolution satellite images – competition to aerial images [Text] // Proc.Map World Forum, Hyderabad, India – 2010.
11. Park S. C. Super-resolution image reconstruction: A technical overview [Text] / Park S. C., Park M. K., Kang M. G. // IEEE Signal Processing Magazine. – 2003. – Vol. 20. – № 3. – R. 21–36.
12. Rashchupkin, A.V. Tekhnologii obrabotki videoinformatsii, obespechivayushchiye kachestvo aerokosmicheskikh izobrazheniy [Tekst] / Rashchupkin A.V. // Polet. – 2008. – № 11. – S. 42 - 48.
13. Tikhonov, V.I. Statisticheskaya radiotekhnika [Tekst] / V.I.Tikhonov. – M.: Sovetskoye radio, 1966. – 677 s.
14. Ostrikov, V. N. Otsenka funktsii rasseyaniya tochki na proizvol'nom snimke posredstvom slepogo vostanovleniya [Tekst] / Ostrikov V.N. // Sbornik trudov nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Tekhnicheskoy zreniye v sistemakh upravleniya 2011». – M.: IKI RAN, 2012. – T.38 – S. 16-21.

15. Sizikov, V.S. Matematicheskiye metody obrabotki rezul'tatov izmereniy [Tekst]: uchebnik dlya vuzov / Sizikov V.S. – SPb: Izd-vo «Politekhnika», 2001. – 239 s.
16. Beyts, R. Vosstanovleniye i rekonstruktsiya izobrazheniy [Tekst] / R. Beyts, M. Mak-Donnel. – M.: Mir, 1989 – 336 s.

**O.A. Ivaschuk**

Belgorod State National Research University, Belgorod  
Doctor of technical sciences, professor of Information Systems Department  
Email: [ivaschuk@bsu.edu.ru](mailto:ivaschuk@bsu.edu.ru)

**N. Shcherbinina**

Belgorod State National Research University, Belgorod  
Candidate of technical sciences, senior lecturer of Information Systems Department

**V. Fedorov**

Belgorod State National Research University, Belgorod  
Postgraduate student  
Email: [fedorov\\_v@bsu.edu.ru](mailto:fedorov_v@bsu.edu.ru)

## ЭВОЛЮЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*В статье проанализирована и обобщена эволюция применения и модификации пяти основных строительных материалов: натуральный камень, древесина, железобетон, керамика и сталь - с древнейших времен до XXI века. Рассмотрены перспективы развития каждого из упомянутых материалов в свете возможного использования их для строительства большепролетных конструкций покрытий зданий и сооружений. Приведены примеры зданий и сооружений для каждого материала в зависимости от периода его использования. Перспективными для строительства зданий больших пролетов могут быть композиты на основе древесины (клееная древесина), композиты на основе бетона (железобетон, фибробетон с металлической фиброй, фибробетон с древесными опилками) и сталь.*

**Ключевые слова:** большепролетные конструкции, строительный материал; натуральный камень, древесина; керамический камень, бетон; железобетон; металл.

Эволюция применения различных строительных материалов тесно связана с природными условиями определенной части планеты, развитием строительных технологий, социального строя, и, конечно, самого человеческого общества. Социальное развитие общества потребовало от архитекторов создания больших свободных пространств для общения между людьми, таким примером могут служить термы Каракалы. Сюда приходили не только смыть грязь, в них отдыхали, обменивались последними событиями, здесь же располагались комнаты для собраний, библиотека. Именно развитие массовых общественных зданий привело к необходимости создания большепролетных пространств. С обретением исторических знаний, взаимообменом опыта, изменением и улучшением технологий расширялось количество и качество строительных материалов и изделий, что давало возможность архитекторам уменьшать толщину строительных изделий, облегчать их, увеличивать расстояние между опорами, создавая большие свободные пространства внутренних объемов зданий и сооружений.

Первым строительным материалом человека был **натуральный камень** (песчаник, известняк, гранит, др). Дольмены, менгиры, кромлехи и другие мегалитические сооружения, возраст которых, по выводам археологов и историков, предположительно от 4700 до 3400 лет, были созданы из огромных необработанных каменных глыб и послужили прообразом архитектурных древнегреческих сооружений в период позднего неолита или раннего бронзового века [4].

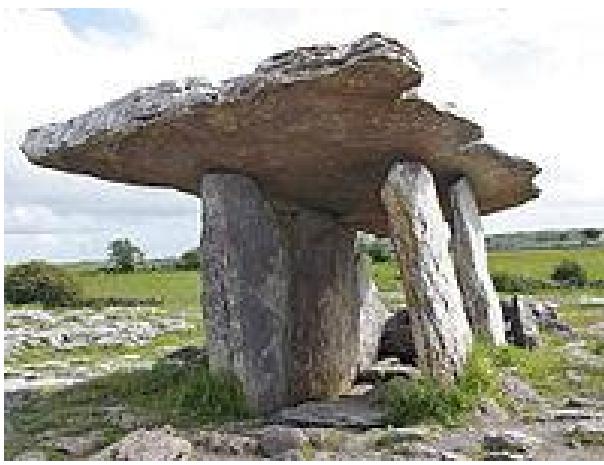
Более поздней археологической находкой из натурального камня можно назвать древний египетский «лабиринт» рядом с озером Биркет-Карун, недалеко от современного города Каира. Возраст этого сооружения примерно 4300 лет. «После падения Египетской мировой державы впечатляющие колонны красного гранита, огромные каменные плиты и отполированный известняк были украдены и использованы для строительства других построек» [7].

Древнегреческий историк Геродот Галикарнасский (около 484—430 до н. э.) пишет об этом лабиринте в своем трактате «История» [6]:

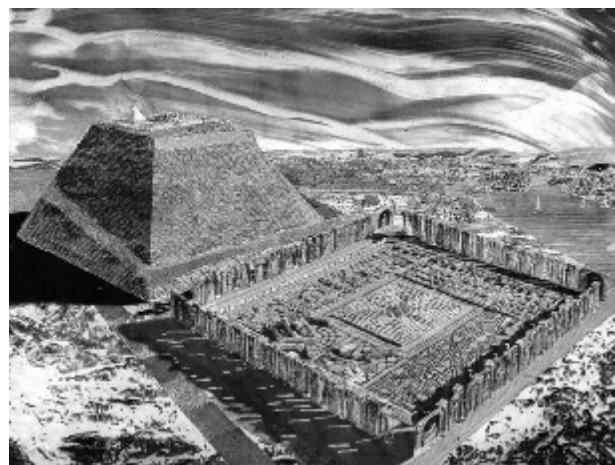
«...Всюду каменные крыши, так же, как и стены, а эти стены покрыты множеством рельефных изображений. Каждый двор окружен колоннами из тщательно приложенных кусков белого камня...» (рис. 2).

Сооружение египетского лабиринта является по историческим меркам ровесником мегалитических сооружений, но технологии строительства уже были применены другие. Вместо

громадных каменных глыб человек использовал каменные блоки, притирая их один к другому и соединяя при помощи раствора глины и извести. Это было уже прообразом бутовой кладки.



*Рисунок 1 – Дольмен в Буррене, Ирландия  
(Источник: [xperehod.com](http://xperehod.com))*



*Рисунок 2 – Египетский лабиринт.  
Рисунок Тони Пекораро (Источник:  
<http://art.mirtesen.ru/blog/43007412366/>  
Gravyuryi-Toni-Pekoraro)*

Начиная с V века до н.э. для строительства водопровода натуральный камень (мрамор, травертин, известняк) начинают применять для конструкций акведуков. Так, Римские акведуки (рис. 4) были построены из плотно подогнанных каменных блоков объемом около 2 м<sup>3</sup> из известняка. Известняк – хрупкий и мягкий камень, но сооружения эти простояли, по данным ученых, более 2400 лет. Использование каменного материала было в сочетании со штукатуркой из известняка, песка и каменной крошки, слой которой защищал акведук от влияния воды и внешних осадков.



*Рисунок 3 – Мамертинская тюрьма  
(г. Рим, Италия)*



*Рисунок 4 – Древнеримский акведук в г. Кавале  
(Греция)*

Все древние храмы (Олимпийский храм Зевса, храм Посейдона, храм Зевса в Кирене и многие другие) строились из натурального и искусственного камня по одной и той же технологии: массивные часто поставленные колонны (через 1,5 – 3 м), перекрытые каменными балками высотой сечения более метра (рис. 5, а, б, в).



а) Храм Зевса, VI в. до н.э.  
(Афины)

б) Храм Геры, VI в. до н.э. (Италия)

в) Храм Посейдона, V в. до н.э.  
(Греция)

*Рисунок 5 – Древние каменные постройки с VI до V вв. до н.э.*

В дальнейшем технология строительства из натурального камня изменилась на мелкоблочное с несущими каменными стенами как, например, изображено на рисунке А. М. Васнецова (рис. 6) конца XVII века. Благодаря применению натурального известняка Москву стали называть «Московой белокаменной». По словам Лермонтова М.Ю. в «Песне про царя, опричника и купца»:



*Рисунок 6 – Всехсвятский мост и Кремль в конце XVII века. Картина А. М. Васнецова*

«...Над Москвой великой, златоглавою,  
Над стеной кремлевской белокаменной...».

Начальной архитектурной моделью сооружений из камня стали мегалитические постройки из каменных глыб, но уже через несколько столетий появились сооружения из каменных блоков (вначале без связующего раствора, а позже и с ним), что дало технически большие возможности для строительства. После нескольких тысячелетий практики над возможностями каменного материала архитекторы и строители XXI века используют этот материал лишь для облицовки зданий и сооружений в виде плит или блоков (рис. 7, схема 3 – фото А.А. Евсеев).



*Рисунок 7 – Схема эволюции технологий строительства с помощью натурального камня  
(слева направо: рис. 1 – Дольмен; фото 2 – храм Геры; фото 3 – метро Беларусская)*

Параллельно развитию технологии строительства зданий из натурального и искусственного камня, развивалось **деревянное строительство**. Но если каменное строительство было направлено на гробницы и погребальные храмы, на храмы и монументальные сооружения, то деревянное – в основном, на жилище и церкви.

Самые ранние деревянные постройки не могли сохраниться — их уничтожили многочисленные пожары. Ученые считают, что самой древней деревянной постройкой является кранног (ирл. crannóg), возраст которого примерно 5000 лет. Первые зимние жилища славян –

кранноги - по данным археологов и историков представляли собой землянку с очагом, закрытую конической деревянной крышей (рис. 8).

От средних веков вплоть до середины XX века строительство из древесины претерпевало весьма небольшие изменения. Революцией в деревянном домостроении послужило появление kleenой древесины, позволивший по-новому взглянуть на этот материал. Теперь после второго рождения композитного материала на основе древесины его использование с успехом расширилось до строительства сооружений больших пролетов и даже многоэтажных зданий (рис. 9).

Развитие технологий строительства на основе древесины прошло долгий путь от «озерного домика» до большепролетных сооружений (рис. 10), превратив сплошную древесину в композитный материал.



Рисунок 8 – «Озерный домик» - кранног. (Восстановленный домик в Шотландии) примерно 2917 г. до н. э.

Источник: <http://www.vinimini.com/970/>



Рисунок 9 – Интерьер «Теннисного центра» с 2-шарнирными арками пролетом 42м.

(Источник: фото С.Б.Турковского)

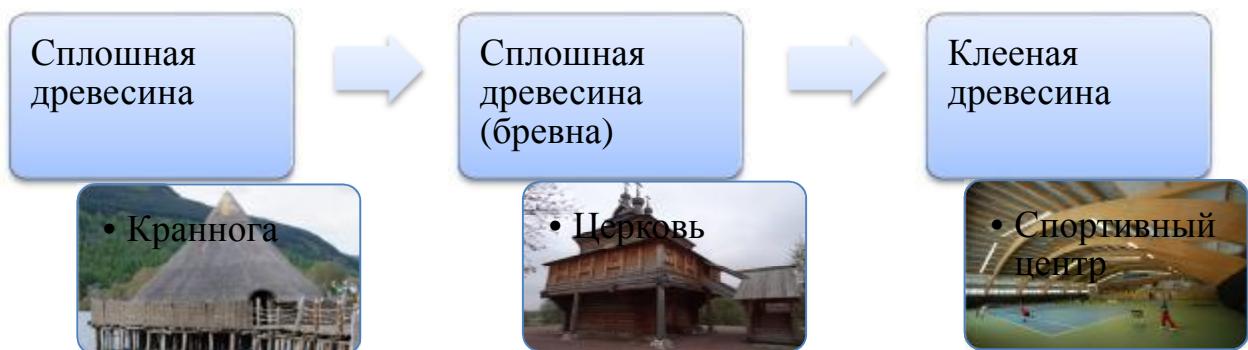


Рисунок 10 – Схема изменения и развития технологий строительства с помощью древесины

Археологические раскопки подтверждают тот факт, что эволюция каменных материалов и древесины происходила параллельно линии развития технологии производства сначала необожженного **кирпича** (самана, который изготавливался из известковой пористой глины с добавлением смолы, кварца и других минералов, и высушивался на солнце), а позднее в Египте около 5 тысячелетий назад - кирпича, который обжигали в печах. До сих пор сохранились пирамиды, созданные ацтеками из самана (рис. 11).



**Рисунок 11 – Пирамида культуры Моче (Перу),  
(500–800 годы)**

(Источник: [http://zhizn-zemli.ru/news/v\\_peru\\_ognaruzhena\\_neobychnaja\\_piramida\\_kultury\\_mochе/2012-10-30-1755](http://zhizn-zemli.ru/news/v_peru_ognaruzhena_neobychnaja_piramida_kultury_mochе/2012-10-30-1755))

Появление кирпичей на Руси в X в. связывают с влиянием византийской культуры. Именно в период крещения Руси в 988 г. из Византии приехали люди, владевшие секретами производства обожженного кирпича (плимфы).

В Москве кирпичные дома появились в XV веке. В этот же период построен в Москве и первый кирпичный завод. Начиная со средних веков технология строительства из мелкоштучного керамического материала практически не изменилась.

Керамические конструкции и изделия не используются для несущих конструкций большепролетных зданий и сооружений, но с успехом применяются в многоэтажном и высотном строительстве для ограждающих стен, для облицовки зданий и сооружений, в составе сплошной и эффективной слоистой кирпичной кладки.

Важной ступенью в развитии возможностей в применении строительных материалов для строительства зданий больших пролетов стало появление искусственного (т.е. бетонного) камня, применение которого позволило строить здания и сооружения с большим внутренним свободным пространством, чем раньше.

Наиболее ранний **бетон**, по данным археологов, относится к 5600 г. до н.э. На территории Сербии в одной из хижин древнего поселения каменного века был сделан бетонный пол (на основе гравия и красноватой местной извести). Развитие технологии строительства из бетонного камня шло неравномерно и могло бы даже остановиться, если бы не появление нового композитного материала – железобетона, автором изобретения которого в 1867 г. является французский садовник Жозеф Монье.

Первым железобетонным зданием было здание в Ливерпуле, после чего этот композитный материал, несмотря на активное развитие и применение металлических конструкций в строительстве, в связи с политикой экономии стали, почти на целый век стал лидирующим в мире. Рассматривая объем применения этого материала среди других для зданий любого назначения и этажности, можно назвать двадцатый век «век железобетонный», по аналогии с названиями периодов развития человечества – каменный, бронзовый, железный. Во второй половине XX века были спроектированы и построены такие уникальные железобетонные здания как оперный театр в Сиднее, Австралия (рис. 14), в России это Даниловский рынок со складчатой железобетонной оболочкой толщиной 3-4 см (рис. 12); здание стадиона "Дружба" Олимпийский комплекс "Лужники" со складчатым железобетонным покрытием с наибольшим пролетом оболочки в плане - 96 м и максимальной высотой конструкции зала от опор 20 м

По определению Владимира Даля [8], кирпич – «деланый камень», т.е. ненатуральный рукотворный камень и помещающийся для удобства в руке рабочего.

Историки утверждают, что первый кирпич был изготовлен в древнем Китае. Кирпич там имел форму глиняных бутылок.

Высушенный на солнце кирпич (саман) производился из смеси глины, песка и соломы в безлесных районах в V – IV вв. до н.э. В этой технологии строятся дома из пяти – семи этажей даже в наше время.

Именно появление кирпича (т.е. штучного изделия) позволили увеличить пролет между опорами при помощи создания кирпичных арок, сводов и др. видов строительных изделий и конструкций.

(рис. 13); Курский вокзал с железобетонным складчатым покрытием длиной 45 м и вылетом консоли до 12 м (рис. 15) многие другие.

**Железобетон**, как строительный материал, и до сих пор остается лидирующим материалом в сборном и монолитном строительстве. История этого удивительного по своим возможностям материала развивается благодаря возможным изменениям состава бетонной смеси, изобретения специальных добавок, позволяющих строить в период зимних холодов или в жарком климате, увеличению времени твердения, изобретению тонкостенных пространственных систем с большими возможностями по величине пролетов, изменению технологии строительства. Без железобетона не обходится ни один фундамент любого здания – от одноэтажного сооружения до небоскреба. Именно этот экономичный по сравнению со сталью материал может использоваться для многоэтажных, высотных зданий. В последние десятилетия он был незаслуженно забыт для строительства пространственных большепролетных конструкций покрытий зданий и сооружений. С 80-х годов XX столетия вплоть до настоящего времени проводятся теоретические исследования по возможности использования бетонных сборных арок диаметром до 70 м с возможностью изменения высоты подъема [5].

Можно уверенно сказать, что композитный материал на основе бетонного камня с применением стали, древесного материала или пластмассы будет развиваться в XXI веке с новым витком спирали.



*Рисунок 12 – Здание Даниловского рынка с покрытием в виде железобетонного складчатого купола со встречными складками-козырьками; D =72 м (архитектор покрытия - Нодар Канчели);*



*Рисунок 13 – Здание УСЗ "Дружба" Олимпийский комплекс "Лужники" со складчатым железобетонным покрытием (наибольший пролет оболочки в плане - 96 м; макс. высота конструкции зала - 20 м)*



*Рисунок 14 – Складчатое покрытие оперного театра в Сиднее, Австралия*



*Рисунок 15 – Здание Курского вокзала с железобетонным складчатыми покрытием длиной 45 м*

Самым поздним материалом в истории эволюции человеческого общества для строительства несущих частей любого здания, который изменил мышление человека на строитель-

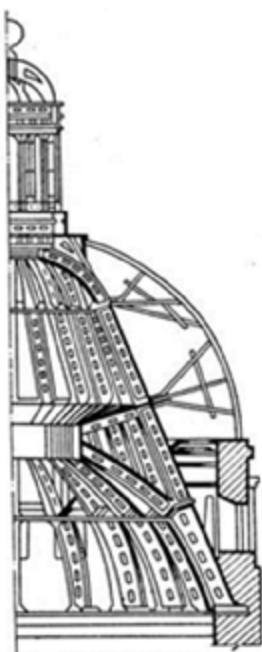
ство и позволил удовлетворять самые невероятные идеи архитекторов современности, стал металл.

Не останавливаясь на истоках появления первых бронзовых изделий в период железного века (XIV — XIII вв. до н. э.) вплоть до конца первой половины I тысячелетия до н. э., когда, по словам Ф. Энгельса, железо стало «важнейшим из всех видов сырья», перейдем сразу к XII в., когда металл применялся в виде затяжек и скреп для каменной кладки при строительстве уникальных сооружений (дворцов, церквей, др.). С начала XVII века металл использовался для зданий с пролетами выше 18 м. Вспомним, например, перекрытие старого Кремлевского дворца в Москве (1640 г.) или каркас купола колокольни Ивана Великого (1603 г.).

Уникальной чугунной конструкцией середины XIX века является купол Исаакиевского собора (1840-х гг.), где отдельные металлические изделия соединены в сплошную пространственную конструкцию в виде оболочки (рис. 16).

В начале XX века академиком В. Г. Шуховым (рис. 17) были изобретены пространственные сетчатые конструкции покрытий и гиперболоидные башни, что привело в взлете архитектурной и инженерной мысли в разработке возможностей стальных конструкций. После Второй мировой войны стальные конструкции, перекрывающие пролеты выше 500 м, смогли «отодвинуть» железобетон на второй план. Огромные возможности для архитекторов открыты благодаря появлению мембранных (рис. 18), сетчатых конструкций (рис. 19), применению легких синтетических ограждающих материалов, которые дополняют опорные металлические конструкции, создавая визуальную легкость и одновременно имея высокую прочность.

Металл прошел быстрый по историческим меркам эволюционный путь от соединительных частей в кирпичной кладке к большепролетным зданиям, претерпевая те изменения, которые позволили строить небоскребы и здания и сооружения любых пролетов, материализуя самые невероятные идеи архитекторов.



*Рисунок 16 – Купол Исаакиевского собора, собранный из отдельных косяков в виде сплошной оболочки (Источник: [2])*



*Рисунок 17 – Башня Шухова (Источник: [2])*



*Рисунок 18 – Седловидное висячее покрытие арены в городе Ралей, США  
Источник: [3]*



*Рисунок 19 – Строительство сетчатой конструкции покрытия аэропорта Внуково*

Рассмотрев эволюцию основных строительных материалов в разрезе исторических этапов развития человеческого общества, можно уверенно сказать, что перспективными для строительства зданий больших пролетов могут быть композит на основе древесины (клееная древесина), композит на основе бетона (железобетон, фибробетон с металлической фиброй, фибробетон с древесными опилками) и сталь. Каждый из этих материалов имеет свои достоинства и недостатки, но все они могут с успехом применяться в строительстве уникальных зданий больших пролетов, имея внутренние ресурсы для разработки новых композитных материалов, которые позволяют создавать еще более уникальные, инновационные, прогрессивные строительные материалы, позволяющие увеличивать накрываемые пространства и территории.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анчабадзе, З.В. История и культура Древней Абхазии [Текст] / З.В. Анчабадзе. – М.: Наука, 1964. – 239 с.
2. Беленя, Е.И. Металлические конструкции [Текст] / Е.И. Беленя, Д.Н. Стрелецкий. – М: Стройиздат, 1991. – 687 с.
3. Косенко, И.С. Висячие конструкции покрытий [Текст] / И.С. Косенко. – М.: Стройиздат, 1966. – 87 с.
4. Рыбников, В. Тайны дольменов. Золотое сечение [Текст] / В. Рыбников. – М., 2008. – 156 с.
5. Пат. RU 109479 МПК E04B 7/08 (на полезную модель). Сборное железобетонное сводчатое покрытие / Соколов Б. С., Щербина Т. В., Шугаев В. В.; 20.10.2011. Бюл. № 29.
6. Геродот. История. [Текст] / пер. и прим. Г.А. Стратановского; под общ. ред. С.Л. Утченко; редактор пер. Н.А. Мещерский; отв. редактор С.Л. Утченко. – Л.: Наука, 1972. – 600 с.
7. Лабиринты. В чем их загадка? История [Электронный ресурс] // История на [rin.ru](http://rin.ru) – URL: <http://history.rin.ru/cgi-bin/history.pl?num=242>
8. Толковый словарь В. Даля [Электронный ресурс] // Толковый словарь Даля онлайн. – URL: <http://slovardalja.net>.

#### Е.В. Сысоева

МГАХИ им. В.И. Сурикова, г. Москва

Кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой инженерно-строительных дисциплин  
E-mail: [sev4279@yandex.ru](mailto:sev4279@yandex.ru)

#### А.А. Магай

АО «ЦНИИЭП жилища», г. Москва

Кандидат архитектуры, директор по научной деятельности АО «ЦНИИЭП жилища», профессор кафедры инженерно-строительных дисциплин МГАХИ им. В.И. Сурикова  
E-mail: [magay\\_1@mail.ru](mailto:magay_1@mail.ru)

---

E. SYSOEVA, A. MAGAI

### THE EVOLUTION AND THE PROSPECTS OF THE DEVELOPMENT OF THE MAIN BUILDING MATERIALS FOR THE LONG-SPAN STRUCTURES CONSTRUCTION

*The article analyzes and summarizes the evolution of the use and the modification of five basic building materials – natural stone, wood, concrete, ceramics and steel from ancient times until the twenty-first century. It considers prospects of development of all these materials in light of their possible using for construction of long-span structures of coatings of buildings and structures. Examples of buildings and structures for each material in depending on the period are given. As promising for the construction of buildings of large spans can be used composites on the basis of wood (laminated wood), composites on the basis of concrete (reinforced concrete, fiber-reinforced concrete with metal fibers and the fiber-reinforced concrete with wood sawdust) and steel.*

**Keywords:** long-span structure, construction material, natural stone, wood, ceramic stone, concrete; reinforced concrete; metal.

## BIBLIOGRAPHY

1. Anchabadze, Z.V. Istorya i kul'tura Drevney Abkhazii [Tekst] / Z.V. Anchabadze. – M.: Nauka, 1964. – 239 s.
2. Belenya, Ye.I. Metallicheskiye konstruktsii [Tekst] / Ye.I. Belenya, D.N. Streletskiy. – M: Stroyizdat, 1991. – 687 s.
3. Kosenko, I.S. Visyachiye konstruktsii pokrytiy [Tekst] / I.S. Kosenko. – M.: Stroyizdat, 1966. – 87 s.
4. Rybnikov, V. Tayny dol'menov. Zolotoye secheniye [Tekst] / V. Rybnikov. – M., 2008. – 156 s.
5. Pat. RU 109479 MPK E04B 7/08 (na poleznuyu model'). Sbornoye zhelezobetonnoye svodchatoye pokrytiye / Sokolov B. S., Shcherbina T. V., Shugayev V. V.; 20.10.2011. Byul. № 29.
6. Gerodot. Istorya. [Tekst] / per. i prim. G.A. Stratanovskogo; pod obshch. red. S.L. Utchenko; redaktor per. N.A. Meshcherskiy; otv. redaktor S.L. Utchenko. – L.: Nauka, 1972. – 600 s.
7. Labirinty. V chem ikh zagadka? Istorya [Elektronnyy resurs] // Istorya na rin.ru – URL: <http://history.rin.ru/cgi-bin/history.pl?num=242>
8. Tolkovyy slovar' V. Dalya [Elektronnyy resurs] // Tolkovyy slovar' Dalya onlайн. – URL: <http://slovardalja.net>.

### E. Sysoeva

V. Surikov Moscow state academic art institute of Russian academy of arts, Moscow  
Candidate of technical sciences, associated professor, head of the Department of engineering and construction disciplines of the architecture faculty  
E-mail: [sev4279@yandex.ru](mailto:sev4279@yandex.ru)

### A. Magai

Institute of complex design of residential and public buildings, Moscow  
Candidate of architecture, director for scientific activities of JSC "ICDRPB" (Institute of complex design of residential and public buildings), professor of the Department of engineering and construction disciplines of V. Surikov of Moscow state academic art institute of Russian academy of arts  
E-mail: [magay\\_1@mail.ru](mailto:magay_1@mail.ru)

УДК 666.94.052.6

АКУЛОВА М.В., СЕЛИВЕРСТОВА О.В.

## **ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК-РЕГУЛЯТОРОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА**

*В статье рассматривается влияние дозировки химических добавок – регуляторов структурообразования различного происхождения на гидратацию и сроки схватывания цементного камня, а также на динамику набора прочности бетона и его морозостойкость. В качестве исследуемых компонентов применялись ускоритель схватывания и твердения – смесь солей СБС на основе тиосульфата и роданида натрия, и водный раствор содосульфатной смеси ССС неорганического происхождения. Исследования дозировок добавок проводились на Мордовском среднеалюминатном портландцементе ЦЕМ I 42,5 Б с  $C_3A=7\%$ .*

**Ключевые слова:** тиосульфат и роданид натрия, содосульфатная смесь, цемент, дозировка, ранняя прочность, морозостойкость.

К добавкам – регуляторам, ускоряющим и замедляющим структурообразование каркаса бетона, относятся различные соединения органической и неорганической природы, которые достаточно часто встречаются в комплексе с модифицирующими добавками [2]. Принцип работы добавок, регулирующих процессы схватывания и твердения в цементной системе различного происхождения тоже различен. Так, исследуя класс солей органических кислот, в качестве регуляторов схватывания и твердения чаще всего можно наблюдать карбоновые и оксикарбоновые кислоты, которые изменяют состав жидкой фазы, уровень и условия выделения новообразований, но не участвуют в создании структуры твердения бетона. Добавки – электролиты позволяют изменять растворимость вяжущих веществ, проявляя тем самым эффективность в создании структуры прочности бетона и способны образовывать труднорастворимые соединения [1]. Особенno актуальным является применение ускорителей твердения в производстве железобетонных изделий, где требуется быстрая оборачиваемость форм, сокращение цемента и других технико-экономических показателей. Более того, в сочетании с добавками полифункционального действия либо их применение с низкоалюминатными цементами действие ускорителей проявляется наиболее выраженно и позволяет тем самым внедрение их в другие области применения. Проявление ранней распалубочной прочности бетона является следствием действия эффективности добавок такого класса и зависит от выбранной концентрации раствора и составляющих частей материалов бетона [5]. Поэтому, целью исследования данной работы является влияние дозировки добавок – регуляторов схватывания и твердения на распалубочную, проектную прочность бетона и на его морозостойкость.

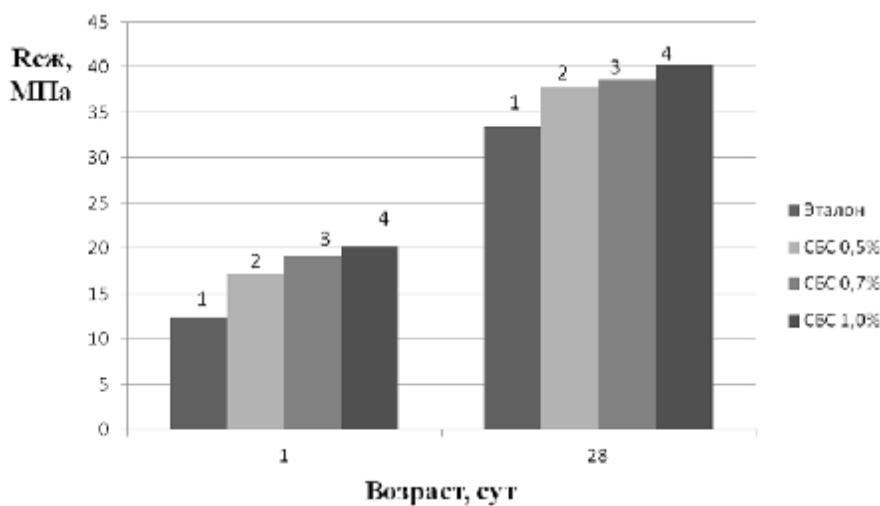
В качестве исследуемых компонентов, ускоряющих структурообразование бетона, были выбраны: смесь балластных солей СБС на основе тиосульфата и роданида натрия –  $Na_2S_2O_3 + NaCNS$  и водный раствор содосульфатной смеси ССС неорганического происхождения 80%  $Na_2SO_4 + 20\% Na_2CO_3$ . Данные смеси представляют собой водный 35 - % рабочий раствор, готовый для введения его в бетонную смесь. Для приготовления бетонной смеси были выбраны следующие материалы: среднеалюминатный портландцемент Мордовский ЦЕМ I 42,5 Б  $C_3A = 7,0\%$ ; песок природный с  $M_k = 2,2$ ; щебень гранитный фракции 5 – 20 мм и марки по дробимости М-1200. Испытания бетонной смеси с добавками проводились в соответствии с ГОСТ 30459 – 2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности».

Известно [1], что добавки на основе карбонатов и сульфатов натрия при незначительных дозировках проявляют ускоряющее действие, но также могут вести себя как замедлители при увеличенных дозировках более 2,0 % от массы цемента. Это объясняется составом и строением молекулы вводимого вещества в бетонную смесь, а также тем, что скорость реакции гидратации в зависимости от состава и количества жидкой фазы протекает не одинаково. Так, при исследованиях влияния сульфата натрия в бетонах на процессы его схватывания и твердения наблюдалось, что данные вещества взаимодействуют с гидроксидом кальция, который выделяется при гидролизе  $C_3S$ . Вследствие этого выделяющийся мелкодисперсный гипс реагирует с трехкальциевым алюминатом более интенсивнее. Поэтому, кристаллизация гидросульфоалюмината кальция приводит к сокращению индукционного периода, нарастанию кристаллизационного каркаса и набору ранней прочности бетона. Характеристика бетонной смеси и показатели прочности бетона с добавкой СБС, ускоряющей схватывание и твердение бетона, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства бетона с добавкой СБС  $Na_2S_2O_3 + NaCNS$ 

№	Наименование	Цемент, кг	В/Ц	О.К, см	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	
						1 сут	28 сут
1	Эталон	350	0,52	12,5	2455	12,4	33,4
2	СБС 0,5%	350	0,49	13	2465	+38,7% 17,2	+13,0% 37,7
3	СБС 0,7%	350	0,47	14,5	2435	+54% 19,1	+15,4% 38,6,
4	СБС 1,0%	350	0,45	13,0	2395	+63% 20,2	+20,0% 40,3

В табл. 1 показано влияние дозировки СБС на водоцементное отношение и прочность бетона – за счет пластифицирующего действия сокращение расхода воды и увеличение ранней прочности в равноподвижных смесях. Образцы – кубы бетона испытывались на прочность при сжатии на 1 и 28 сутки нормального твердения. Как видно из результатов прочности бетона, при дозировке добавки 0,5% наблюдается превышение показателей бетона в первые сутки нормального твердения более 38% относительного контрольного состава. Это говорит об эффективном ускоряющем действии СБС за счет большого количества связанной воды и изменения состава жидкой фазы. Далее, с увеличением дозировки 0,7% прочность бетона возрастает в начальные сроки твердения, но уже к 28 суткам наблюдается небольшая тенденция снижения прироста прочности за счет интенсивного нарастания кристаллов структуры в ранние сроки твердения. При дозировке добавки 1,0% от массы цемента при растворении клинкерных минералов и дальнейшей гидратации бетона, где происходит пересыщение жидкой фазы и интенсивное образование гидроалюминатов кальция. Наблюдается прирост прочности бетона в первые сутки +60,8%. Установлено, что пересыщение раствора жидкой фазы минералов клинкера играет ускоряющую роль в процессе гидратации и сроков схватывания цемента. Но для наиболее благоприятного воздействия на формирование улучшенной и более плотной, прочной структуры цементного камня необходимо контролировать насыщение этой фазы, так как быстрый рост кристаллов может привести к внутренним напряжениям [2]. Контроль осуществляется за счет содержания ускорителя и водоцементного отношения бетонной смеси. График кинетики твердения бетона с добавкой – электролитом СБС в различных дозировках представлен на рисунке 1.



1 – график прочности эталона без добавки; 2 – график прочности с добавкой в дозировке 0,5%;  
3 – график прочности с добавкой в дозировке 0,7%; 4 – график прочности с добавкой в дозировке 1,0%

*Рисунок 1 – График набора прочности бетона с добавкой ССС на Мордовском ЦЕМ I 42,5 Р*

Наблюдается динамика превышения прочности бетона с добавкой относительно контрольного состава равной подвижности во все сроки твердения.

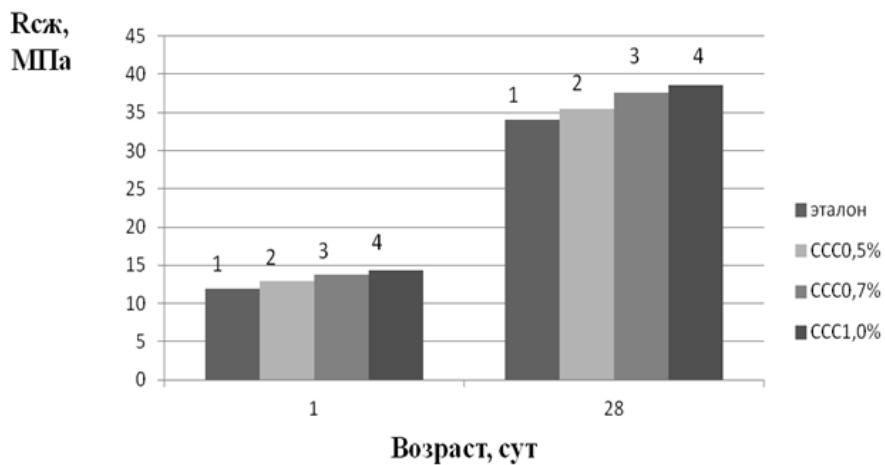
Рассмотрим свойства бетона с добавкой ССС в различных дозировках на среднеалюминатном портландцементе. Свойства бетонной смеси выводились на равноподвижные у контрольного состава и состава с добавкой. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства бетона с ССС  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{CO}_3$

№	Наименование	Цемент, кг	В/Ц	О.К, см	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при сжатии, МПа	
						1 сут	28 сут
1	Эталон	350	0,52	11,0	2435	11,9	34,1
2	ССС 0,5%	350	0,49	13,0	2370	+8,4% 12,9	+4,1% 35,5
3	ССС 0,7%	350	0,49	12,5	22380	+15,1% 13,7	+10,2% 37,6
4	ССС 1,0%	350	0,47	13,0	2365	+21,1% 14,4	+13,2% 38,6

Как видно из результатов испытаний бетона на прочность, у образцов с добавкой при дозировке 0,5% от массы цемента наблюдается небольшое превышение прочности относительно контрольного состава. Необходимо также отметить, что в состав добавки ССС входят соли сильного основания и слабой кислоты, благодаря чему анионы образуют с ионами кальция труднорастворимые соединения, что наиболее активизирует процессы схватывания бетона на ранней стадии набора прочности бетона.

Поэтому, данная дозировка добавки играет положительную роль на создание динамики набора прочности бетона, но не является наиболее эффективной, так как растворение клинкерных минералов и скорость нарастания кристаллов гидратов протекает с меньшей способностью. При увеличении дозировки до 0,7% и 1,0% наблюдается рост прочности бетона относительно эталона на 1 сутки до 15,0% и 20% и на 28 сутки до 4,0% и 14,0% соответственно, что объясняется большим содержанием – 80% сульфатов натрия в составе добавки, являющаяся ускорителем схватывания и твердения. График кинетики твердения бетона с добавкой ССС представлен на рисунке 2.



1 – график прочности эталона без добавки; 2 – график прочности с добавкой в дозировке 0,5%;  
3 – график прочности с добавкой в дозировке 0,7%; 4 – график прочности с добавкой в дозировке 1,0%.

**Рисунок 2 – График набора прочности бетона с добавкой ССС на Мордовском ЦЕМ 1 42,5Б**

Из графика наблюдается стабильная кинетика твердения бетона и увеличение ранней прочности бетона относительно контрольного состава, что говорит об эффективности действия данного компонента, как об ускорителе схватывания бетонов и регулирующих структуру каркаса и дальнейшую кинетику твердения тела бетона.

Влияние добавок – ускорителей схватывания и твердения на морозостойкость бетона играет положительную роль за счет прочности, однородной уплотненной структуры бетона, так как уменьшается появление капиллярных пор в теле бетона. Поэтому, эффективность их действия на повышение класса по морозостойкости бетона определяется совокупностью свойств проектируемого бетона в целом. Испытания на морозостойкость проводились согласно ГОСТ 10060 – 2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости». Результаты испытаний определения морозостойкости приведены в таблице 3. Изготавливались образцы бетона контрольных и основных составов, которые периодически подвергались 200 циклам замораживанию при  $T = -18^\circ\text{C}$  и оттаиванию в воде при  $T = 20^\circ\text{C}$ . По результатам испытаний образцы выдержали 200 циклов замораживания и оттаивания, что соответствует марке бетона по морозостойкости F300.

**Таблица 3 – Показатели морозостойкости бетона с добавками**

№	Наименование	Потеря массы, %	Нижняя граница доверительного интервала $X_{min}^I$ прочности образцов, МПа		Выдержали циклы	Класс по морозостойкости F <sub>1</sub>
			Контрольных $X_{min}^I$	Основных $X_{min}^{II}$		
1	СБС	1,6	33,2	36,4	200	300
2	ССС	1,7	32,8	34,4	200	300

Согласно ГОСТ 10060 – 2012 образцы считаются выдержавшими испытание на морозостойкость, если соблюдается соотношение  $X_{min}^{II} \geq 0,9 X_{min}^I$ . Данное соотношение выдержано, поэтому, добавки могут применяться в бетонах с требуемой морозостойкостью F = 300 и ранней распалубочной прочностью. Таким образом, влияние заполнителей, правильный подобранный состав бетонной смеси, организованный воздух и создание резервных гелевых пор в теле бетона позволяют получить бетоны с хорошей морозостойкостью, но для улучшения технико-экономических и технологических показателей, учитывая среду и климатическую зону эксплуатации конструкции, возможно применение комплексной добавки в бетоны с повышен-

ной морозостойкостью, сочетающий воздухововлекающий компонент и ускоритель твердения, что наиболее благоприятно скажется на физико-механические показатели и раннюю распалубочную прочность бетона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика [Текст] / В.Г. Батраков. – М: Технопроект, 1998. – 768 с.
2. Рамачандран, В.С. Добавки в бетон. Справочное пособие [Текст] / В.С. Рамачандран. – М: Стройиздат, 1988. – 78 с.
3. ГОСТ 30459 – 2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности.
4. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости.
5. Изотов, В.С. Химические добавки для модификации бетона: монография [Текст] / В.С. Изотов, Ю.А. Соколова. – М.: Казанский Государственный архитектурно-строительный университет: Издательство «Палеотип», 2006. – 176 с.

**М.В. Акулова**

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный архитектурно-строительный университет», г. Иваново  
Доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой производство строительных материалов

**О.В. Селиверстова**

Государственный Ивановский Архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Аспирант  
E-mail: [tds\\_tp@mail.ru](mailto:tds_tp@mail.ru)

---

M. AKULOVA, O. SELIVERSTOVA

## THE EFFECT OF ADDITIVES-REGULATORS OF STRUCTURE FORMATION ON THE DURABILITY OF HEAVY CONCRETE

*The article examines the dosage influence of additives – structure formation regulators of different origin on hydration, setting time of cement paste, as well as on the dynamics of strength increase and frost resistance of concrete. As the components studied we have taken the setting and hardening accelerators – mixture of ballast salts MBS based on sodium thiosulfate and thiocyanate, and water solution of soda sulfate mixture SSM of inorganic origin. The research of additives dosage has been carried out with the use of Mordovia medium aluminate Portland cement CEM I 42,5 B with  $C_3A = 7\%$ .*

**Keywords:** sodium thiosulfate and thiocyanate, soda sulfate mixture, cement, dosage, early strength, frost resistance.

## BIBLIOGRAPHY

1. Batrakov, V.G. Modifitsirovannyye betony. Teoriya i praktika [Tekst] / V.G. Batrakov. – M: Tekhnopro-yekt, 1998. – 768 s.
2. Ramachandran, V.S. Dobavki v beton. Spravochnoye posobiye [Tekst] / V.S. Ramachandran. – M: Stroyizdat, 1988. – 78 s.
3. GOST 30459 – 2008. Dobavki dlya betonov i stroitel'nykh rastvorov. Opredeleniye i otsenka effektivnosti.
4. GOST 10060-2012. Betony. Metody opredeleniya morozostoykosti.
5. Izотов, V.S. Khimicheskiye dobavki dlya modifikatsii betona: monografiya [Tekst] / V.S. Izотов, YU.A. Sokolova. – M.: Kazanskiy Gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet: Izdateльstvo «Paleo-tip», 2006. – 176 s.

**M. Akulova**

Ivanovo state university of architecture and civil engineering, Ivanovo  
Doctor of technical sciences, professor, head of the building material production department

**O. Seliverstova**

Ivanovo state university of architecture and civil engineering, Ivanovo  
Postgraduate student  
E-mail: [tds\\_tp@mail.ru](mailto:tds_tp@mail.ru)

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

*В статье сформулирован общий подход к построению структурной модели упругих строительных роботизированных систем, которые можно представить в виде совокупности последовательно соединенных упруго деформирующихся тел, и предложена методика перехода к такой структуре. В работе подробно описан метод построения математических моделей манипуляторов с упругими связями, основанный на принципе конечных разбиений, отличающейся введением фиктивных степеней подвижности в точках критических к деформациям, а также рассмотрен пример построения модели строительно-монтажной роботизированной системы на основе предложенного метода.*

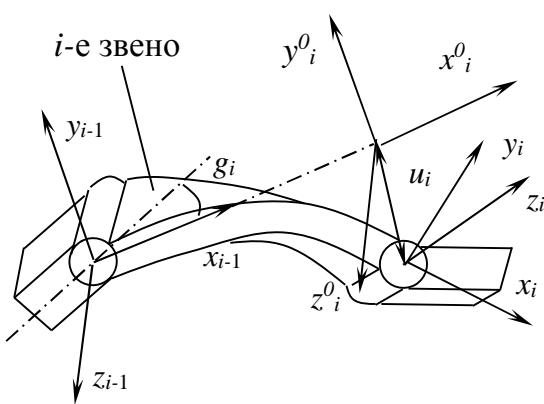
**Ключевые слова:** строительные роботизированные системы, математические модели, упругие деформации.

### 1. Введение

Особенностью построения математических моделей строительных роботизированных систем является необходимость учета упругих деформаций звеньев манипуляционной системы, возникающих при действии динамических нагрузок. В первую очередь это относится к монтажным, бетоноукладочным и штукатурным строительным роботизированным системам.

### 2. Общая концепция построения моделей упругих манипуляторов

Сформулируем общую концепцию построения структуры упругих манипуляторов строительных роботов. В соответствии с принципом конечных разбиений такие манипуляторы можно рассматривать как совокупность последовательно упруго соединенных жестких тел. На основе этого предложено при построении моделей упругих манипуляторов рассматривать их в виде структуры, которая наряду с фактическими степенями подвижности содержит фиктивные, имитирующие упругие деформации звеньев (рис. 1).



*Рисунок 1 – Модель упругого манипулятора*

Переход к такой структуре выполняется на основе анализа манипуляционной системы с целью определения для деформируемых звеньев точек, наиболее критичных к деформации (ТКД). В качестве таких точек, выбираются те, в которых отношение предельного напряжения при работе манипулятора к удельной деформации элемента конструкции достигает максимума.

Элемент конструкции, которому принадлежит ТКД, разбивается в этой точке на два тела, соединенные фиктивным шарниром. При построении математической модели шарнир заменяется тремя взаимно перпендикулярными вращательными степенями подвижности с центром вращения, совпадающим с ТКД. Однако в зависимости

от вида деформации звеньев число степеней подвижности фиктивного шарнира может быть уменьшено до одного. Введение фиктивных степеней подвижности позволяет учесть смещения, обусловленные наличием упругих деформаций. При построении динамической модели такой структуры манипулятора вводим уравнения для обобщенных сил фиктивных звеньев

для учета сил упругости. Параметры этих уравнений идентифицируются из условия наибольшего соответствия математической модели реальному манипулятору. Если не удается получить требуемую точность параметров модели, то производится поиск еще одной ТКД с последующим введением в модель фиктивных степеней подвижности [1].

### 3. Математические модели строительных роботов

Для математического описания предлагаемой структуры манипулятора используем матричный метод. В соответствии с матрицей преобразования систем координат робота  $T_c(\mathbf{q}_c) = T_{bc} \times A_0(\mathbf{q}_c)$  декартовы координаты рабочего органа манипулятора равны:

$$\bar{\mathbf{x}}(\mathbf{q}) = \mathbf{f}(\mathbf{q}, \mathbf{dx}) = \left\{ (T(\mathbf{q}) \times \Delta \mathbf{x})_j \right\}_j, \quad (1)$$

где  $\Delta \mathbf{x}$  – координаты инструмента или схвата в системе координат выходного звена манипулятора. Ориентацию рабочего органа определим из сравнения элементов подматрицы поворота матрицы  $T_c(\mathbf{q})$  и матрицы вращения углов Эйлера, в результате получим

$$\begin{aligned} j &= \frac{\arctg 2(-T^{(1,2)}, T^{(2,2)})}{\arcsin T^{(3,2)}} \div, \\ e &= \frac{\arctg 2(-T^{(3,1)}, T^{(3,3)})}{\arcsin T^{(1,3)}} \end{aligned}$$

где  $\arctg 2(x)$  – функция обратная тангенсу.

Для удобства анализа моделей манипулятора разобьем обобщенные координаты на управляемые  $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_m)^T$  и обобщенные координаты, описывающие деформацию элементов манипулятора  $\mathbf{q}^d = (q_1, q_2, \dots, q_{n-m})^T$ , при этом  $\mathbf{q} = \mathbf{q}^d \dot{+} \mathbf{q}^s$ .

При решении обратной задачи о положении и скорости относительно управляемых координат  $\mathbf{q}^s$  считаем, что фиктивные обобщенные координаты  $\mathbf{q}^s$  и их скорости  $\dot{\mathbf{q}}^s$  известны (измерены или рассчитаны на модели). Аналитическое решение нелинейного тригонометрического уравнения (1) относительно переменных  $\mathbf{q}^s$  затруднено наличием нелинейностей. Для управления строительными роботами решение обратной задачи кинематики удобно выполнять на основе использования итерационного приближения и построения алгоритма численного решения нелинейного тригонометрического уравнения. Для этого, произведя преобразования уравнения (1) и используя разложение в ряд Маклорена относительно  $q_1^s, \dots, q_n^s$  в точках  $q_1^s = q_1^{(i)}, q_2^s = q_2^{(k)}, \dots, q_n^s = q_n^{(k)}$ , получим

$$Dq_i^{(k)} = - \left. \dot{\mathbf{a}} \times_j \left( q_1^{(i)} \right) \right/ \left. \frac{d\mathbf{x}_j(q_1)}{dq_1} \right|_{q_1=q_1^{(i)}}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $i$  – номер итерации приближения.

Переход между итерациями осуществляется по формуле

$$q_i^{(k+1)} = q_i^{(k)} + Dq_i^{(k)}.$$

Итерации начинаются со значения  $q_i^s = q_i^{(0)}$ , где  $q_i^{(0)}$  – текущее положение, и продолжаются, пока не выполнится условие

$$q_i^s - q_i^{(k)} < \epsilon_i,$$

где  $\epsilon_i$  – точность позиционирования.

Решение прямой задачи кинематики для скорости и ускорения получим дифференцированием уравнения (1).

$$\dot{\mathbf{x}} = G(\mathbf{q}, \Delta \mathbf{x}) \times \dot{\mathbf{q}}, \quad \ddot{\mathbf{x}} = G(\mathbf{q}, \Delta \mathbf{x}) \times \dot{\mathbf{q}}^2 + G(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}} \Delta \mathbf{x}) \times \dot{\mathbf{q}}$$

где  $G(\mathbf{q}, \Delta \mathbf{x})$  – матрица  $[3' n]$  якобиана равная

$$G(\mathbf{q}, \Delta \mathbf{x}) = \left\{ U_{ni}^{(jn)}(\mathbf{q}) \times \Delta \mathbf{x} \right\}_{j,i}, \quad \dot{\mathbf{q}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}} \Delta \mathbf{x}) = \sum_{k=1}^3 \dot{\mathbf{q}}^k U_{nik}(\mathbf{q}) \Delta \mathbf{x} \times \dot{\mathbf{q}}_k \div \dot{\mathbf{y}}_j \mathbf{b}_{j,i},$$

$$i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, 3}.$$

Произведя разделение обобщённых координат на управляемые и неуправляемые получим:

$$\dot{\mathbf{q}} = G(\mathbf{q}, \Delta \mathbf{x}) \times \dot{\mathbf{q}} + G(\mathbf{q}, \Delta \mathbf{x}) \times \ddot{\mathbf{q}},$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = G(\mathbf{q}, \Delta \mathbf{x}) \times \ddot{\mathbf{q}} + G(\mathbf{q}, \Delta \mathbf{x}) \times \ddot{\mathbf{q}} + G(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}} \Delta \mathbf{x}) \times \dot{\mathbf{q}}.$$

Обобщенные скорости и ускорения управляемых координат вычисляются из выражений:

$$\dot{\mathbf{q}} = G(\mathbf{q}, \Delta \mathbf{x})^{-1} (\ddot{\mathbf{q}} - G(\mathbf{q}, \Delta \mathbf{x}) \times \ddot{\mathbf{q}}),$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = G(\mathbf{q}, \Delta \mathbf{x})^{-1} (\ddot{\mathbf{q}} - G(\mathbf{q}, \Delta \mathbf{x}) \times \ddot{\mathbf{q}} - G(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}} \Delta \mathbf{x}) \times \dot{\mathbf{q}}).$$

Динамику робота с учетом сил, возникающих в упругих элементах, опишем зависимостью:

$$\mathbf{M} = D(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \sum_{k=1}^l G^T(\mathbf{q}, \Delta \mathbf{x}^{(k)}) \mathbf{F}_s^{(k)} - \mathbf{M}_w, \quad (2)$$

$$\text{откуда } \ddot{\mathbf{q}} = D^{-1}(\mathbf{q}) \sum_{k=1}^l \mathbf{M} - \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \sum_{k=1}^l G^T(\Delta \mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{q}) \mathbf{F}_s^{(k)} + \mathbf{M}_w \div \emptyset,$$

где  $\mathbf{M}$  – вектор  $[n' 1]$  обобщенных сил, возникающих в сочленениях манипулятора;  $D(\mathbf{q})$  – матрица динамики  $[n \times n]$ , элементы которой равны;  $\mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  – вектор  $[n \times 1]$  кориолисовых, центробежных и гравитационных сил;  $\mathbf{F}_s^{(k)}$  – вектор сил  $[3 \times 1]$ , возникающий в  $k$ -й точке взаимодействия рабочего органа с поверхностью;  $\Delta \mathbf{x}^{(k)}$  – вектор  $[3 \times 1]$  смещения точки приложения  $k$ -й внешней силы;  $\mathbf{M}_w$  – вектор  $[n \times 1]$  обобщенных сил, возникающих в упругих элементах звеньев манипулятора.

Используя оператор разделения обобщенных координат робота  $\mathbf{q}$  на управляемые  $\mathbf{q} \dot{\mathbf{q}}$  и введенные для имитации упругой деформации  $\mathbf{q} \ddot{\mathbf{q}}$ , преобразуем уравнение (2) к виду

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} = D(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} + D(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \sum_{k=1}^3 G^T(\mathbf{d}\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{q}) \mathbf{F}_s^{(k)} - \mathbf{M}_w,$$

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} = D^T(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} + D(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{b}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \sum_{k=1}^3 G^T(\mathbf{d}\mathbf{x}^{(k)}, \mathbf{q}) \mathbf{F}_s^{(k)} - \mathbf{M}_w.$$

Полученная модель упруго деформирующейся манипуляционной системы робота в матричном виде удобна для построения модели строительного робота и построения его алгоритмов управления [2].

#### 4. Модель строительно-монтажного робота

Используя описанную методику моделирования манипуляционных систем, построим кинематические и динамические модели манипулятора монтажного робота. Проанализировав предложенную конструкцию манипулятора, определим число степеней подвижности, включая фиктивные. Особенностью манипулятора является возможность появления упругих деформаций последнего звена как наиболее подверженного деформациям из-за большого соотношения длины к площади сечения. В соответствии с изложенной методикой определяем на этом звене ТКД и вводим в ней шарнир с двумя взаимно перпендикулярными вращательными парами, оси вращения которых перпендикулярны продольной оси [3,4].

В соответствии с рисунком 2 записываем матрицу перехода из абсолютной системы координат, связанной с местом установки робота, в систему координат схвата:

$$T_r(\mathbf{q}_r) = T_{br}(j_{br}, x_{br}) \cdot R(a_{r1}, d_{r1}, p/2, q_{r1}) \cdot R(0, 0, p/2, p/2 + q_{r2}) \cdot R(0, q_{r3}, 0, 0).$$

Тогда прямая задача кинематики относительно точки крепления схвата опишется системой уравнений вида

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_r(\mathbf{q}_r) &= \mathbf{f}_r(\mathbf{q}_r, \mathbf{z}) = \\ &= \begin{cases} a_{r1} + q_{r3} \cos q_{r2} \cos(q_{r1} + j_{br}) + x_{br1} \ddot{\phi} \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_1 \end{cases} \\ &= \begin{cases} a_{r1} + q_{r3} \cos q_{r2} \sin(q_{r1} + j_{br}) + x_{br2} \ddot{\phi} \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_1 \end{cases} \\ &= \begin{cases} d_{r1} + q_{r3} \sin q_{r2} + x_{br3} \ddot{\phi} \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_1 \end{cases} \end{aligned}$$

Для учёта деформации последнего звена введём дополнительные системы координат в точке критической деформации, расположенной на расстоянии  $a_5$  относительно центра 2-ой степени подвижности. Для удобства отсчёта обобщённых координат примем  $q_{r2} = p/2 + q_{r2}$ ,  $q_{r4} = 90 + q_{r4}$ ,  $q_{r4} = 0$ ,  $q_{r5} = 0$  и  $q_{ж,r3} = q_{д,r3} + a_{д,r5}$ . На основании предложенной схемы прямая задача кинематики манипулятора с деформируемым звеном описывается уравнением

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_r(\mathbf{q}_r) &= \begin{cases} l \cos(q_{r1} + j_{br}) - a_{r5} \sin q_{r5} \sin(q_{r1} + j_{br}) + x_{br1} \ddot{\phi} \\ l \sin(q_{r1} + j_{br}) + a_{r5} \sin q_{r5} \cos(q_{r1} + j_{br}) + x_{br2} \ddot{\phi} \\ \dot{z}_1 \end{cases} \\ &= \begin{cases} \sin(q_{r2} - q_{r4}) \cos q_{r5} \dot{x}_{r5} + \sin q_{r2} \dot{z}_1 (q_{r3} + d_{r3}) + d_{r1} + x_{br3} \ddot{\phi} \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_1 \end{cases} \end{aligned}$$

где  $l = \cos(q_{r2} - q_{r4}) \cos q_{r5} \dot{x}_{r5} + \cos q_{r2} \dot{z}_1 (q_{r3} + d_{r3}) + a_{r1}$ .

Введем разбиение вектора обобщенных координат робота  $q_r$  на управляемые  $q_r^c = (q_{r1} \ q_{r2} \ q_{r3})^T$  и фиктивные  $q_r^f = (q_{r4} \ q_{r5})^T$ .

На базе предложенной кинематической модели строим динамическую модель робота. Уравнение динамики манипулятора  $k$ -й руки робота запишем в следующем виде

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_r &= D_r \mathbf{q}_r^c + D_r \mathbf{q}_r^f + \mathbf{b}_r^c + (G_r^c)^T (\mathbf{d}\mathbf{x}_r, \mathbf{q}_r) \mathbf{F}_s, \\ \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_r &= (D_r^c)^T \mathbf{q}_r^c + D_r \mathbf{q}_r^f + \mathbf{b}_r^c + (G_r^c)^T (\mathbf{d}\mathbf{x}_r, \mathbf{q}_r) \mathbf{F}_s, \end{aligned}$$

где  $\mathbf{d}\mathbf{x}_r$  – смещение места крепления робота с устанавливаемым элементом в системе координат последнего звена.

Обобщенный момент управляемых степеней подвижности  $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_r^c$  создается электромагнитными силами приводов робота, а обобщенные силы в фиктивно введенных степенях подвижности равны:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}_r^f = -\mathbf{a}_r \mathbf{q}_r^f - \mathbf{b}_r \mathbf{q}_r^f,$$

где  $\mathbf{a}_r$ ,  $\mathbf{b}_r$  – диагональные матрицы жесткости и диссипации последней руки робота относительно точки критичной к деформации.

## 5. Заключение

Описанные методы построения математических моделей для создания роботов позволяют устранить трудности, связанные с упругими деформациями в механической системе, а также с доступными ветвленими и закрытыми структурами. Применение фиктивных степеней свободы для имитации упругих деформаций позволяет в значительной степени упростить

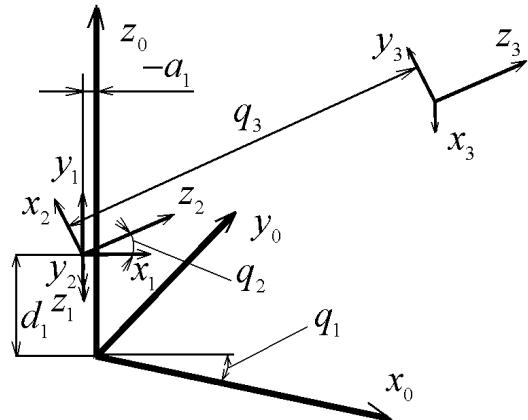


Рисунок 2 – Переход из абсолютной системы координат, связанной с местом установки робота, в систему координат схвата

математические модели роботов. Предложенные методы построения уравнений математических моделей могут быть использованы для разработки алгоритмов управления строительных роботов. Обоснованность допущений, принятых в ходе построения математических моделей, была подтверждена физическими экспериментами и компьютерным моделированием.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bock, T., Bulgakov, A., Parschin, D. Motion planning of mounting robots with intelligent control // 20<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Eindhoven, 2003. pp.127-130.
2. Bock, T., Bulgakov, A., Parschin, D., Tkachev, S. Robotic mounting system for large-panel building // 21<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Seoul, 2004. pp.172-180.
3. Seriani, S., Cortellessa, A., Belfio, S., Sortino M., Totis G., Gallina, P. Automatic path-planning algorithm for realistic decorative robotic painting // Automation in Construction 56 (2015) 67–75.
4. Young Bum Kim, Junhyoung Ha, Hyuk Kang, Pan Young Kim, Jinsoo Park, F.C. Park. Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavators // Automation in Construction 35 (2013), 568–578.

#### А.Г. Булгаков

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск  
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Уникальные здания и сооружения»  
E-mail: [a.bulgakov@gmx.de](mailto:a.bulgakov@gmx.de)

---

A. BULGAKOV

### CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF WITH CONSIDERATION OF ELASTIC DEFORMATIONS

*The article sets out the general approach to building structural models of elastic building robotic systems, which can be represented as a set of successively united of elastic deformable bodies, and the method of transition to such a structure. The article describes the method of constructing mathematical models for manipulators with elastic links, based on the principle of final partitions, characterized by the introduction of fictitious degrees of freedom at points critical to deformation, and consider an example of constructing a model of construction robot based on the proposed method.*

**Keywords:** building robotic systems, mathematic models, elastic deformation.

### BIBLIOGRAPHY

1. Bock, T., Bulgakov, A., Parschin, D. Motion planning of mounting robots with intelligent control // 20<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Eindhoven, 2003. pp.127-130.
2. Bock, T., Bulgakov, A., Parschin, D., Tkachev, S. Robotic mounting system for large-panel building // 21<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Seoul, 2004. pp.172-180.
3. Seriani, S., Cortellessa, A., Belfio, S., Sortino M., Totis G., Gallina, P. Automatic path-planning algorithm for realistic decorative robotic painting // Automation in Construction 56 (2015) 67–75.
4. Young Bum Kim, Junhyoung Ha, Hyuk Kang, Pan Young Kim, Jinsoo Park, F.C. Park. Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavators // Automation in Construction 35 (2013), 568–578.

#### A. Bulgakov

South-West state university, Kursk  
Doctor of technical sciences, professor of the unique buildings and structures department  
E-mail: [a.bulgakov@gmx.de](mailto:a.bulgakov@gmx.de)

## БИОЦИДНЫЙ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ

*Представлены результаты экспериментальных исследований технологических и физико-механических свойств цементов, модифицированных полигексаметиленгуанидин-стеаратом (ПГМГ-С); получены количественные зависимости изменения водоотделения, сроков схватывания, нормальной густоты, равномерности изменения объема цементных паст, а также прочности при сжатии цементного камня от количества биоцидной добавки; представлены результаты исследования цементных композитов, модифицированных ПГМГ-С, на обрастаемость; предложены оптимальные дозировки компонентов биоцидного портландцемента.*

**Ключевые слова:** биоцидный портландцемент, физико-механические свойства, обрастаемость, биоцидная добавка.

В производственной сфере человека одной из самых важных является создание строительных материалов. Из-за большого многообразия различных видов строительных материалов, самыми распространенными являются бетон и железобетон на цементных вяжущих. В этой связи в мировой практике постоянно ведутся научные исследования в области разработки новых видов бетонов, а также совершенствованию известных. В последние годы произошли значительные изменения в технологии бетона. Разработаны бетоны нового поколения, материалы, обладающие бактерицидными и другими специальными свойствами [1, 5, 10], осуществляется постоянное совершенствование известных видов цементов. Улучшаются технологические, физико-механические и другие свойства пластифицированных, гидрофобных, сульфатостойких, смешанных и других видов портландцемента. В последнее время исследователи и практики все большее внимание уделяют приданию фунгицидных и бактерицидных свойств материалам и изделиям и недопущение факта биоразрушения зданий и сооружений. При пониженной стойкости материалов к микробиологической коррозии эксплуатационная надежность изделий и конструкций снижается, а также ухудшается экологическая ситуация в зданиях и сооружениях. Во многих работах показано, что изготовленные с применением портландцемента строительные материалы, изделия и конструкции, взаимодействуя с биологическими средами техногенного и природного происхождения деградируют в результате физических, химических и биологических процессов [2-9, 15]. Экономический ущерб в мире от биоповреждений ежегодно достигает десятков миллиардов долларов. Перечень заболеваний людей, вызванных микроорганизмами, с каждым годом расширяется [7, 8].

Придание портландцементу, гидрофобным, сульфатостойким, пластифицированным и другим цементам бактерицидных и фунгицидных свойств, а также разработка специальных биоцидных цементов является важным направлением исследований в современном строительном материаловедении [11-14]. Повысить биостойкость строительных материалов возможно за счет различных мероприятий и, в том числе, использования биоцидных цементов.

В данной работе удалено внимание получению и исследованию свойств биоцидных цементов. Авторами разработаны биоцидные цементы с применением следующих фунгицидных добавок:  $Na_2SO_4$ ,  $NaF$  и ПГМГ-С [8, 9, 11]. Разработанные вяжущие материалы кроме повышенных биоцидных свойств приводят к улучшению многих других свойств. Состав биоцидного портландцемента, содержащий 100 мас. ч. клинкера, 4–5 мас. ч.  $Na_2SO_4$ , 6–7 мас. ч.  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , отличается повышенной маркой по прочности (М600); содержащий 100 мас. ч.

кинкера, 3–4 мас. ч. NaF, 6–7 мас. ч. CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, отличается пониженным водоотделением (0–4 %); содержащий 100 мас. ч. клинкера, 1–2 мас. ч. ПГМГ–С, 2–6 мас. ч. CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, отличается гидрофобными свойствами.

Технология получения биоцидного портландцемента заключается в совместном помоле цементного клинкера, двуводного гипса и ПГМГ–С до удельной поверхности 2 900 – 3 000 см<sup>2</sup>/г. При изготовлении использовались следующие компоненты: портландцементный клинкер завода ОАО «Мордовцемент» минералогического состава – 3CaO·SiO<sub>2</sub> (59–63%), 2CaO·SiO<sub>2</sub> (16–18%), 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (6–7,5%), 4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (11–12%), двуводный гипс (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) Порецкого месторождения (ГОСТ 4013–82), ПГМГ–С – биоцидный препарат состоящий из сополимера солей гексаметиленгуанидина и стеариновой кислоты (Патент РФ № 2142293). Количество содержание биоцидной добавки в цементе варьировалось от 0 до 2 мас. ч., двуводного гипса от 0 до 8 мас.ч. на 100 мас.ч. клинкера.

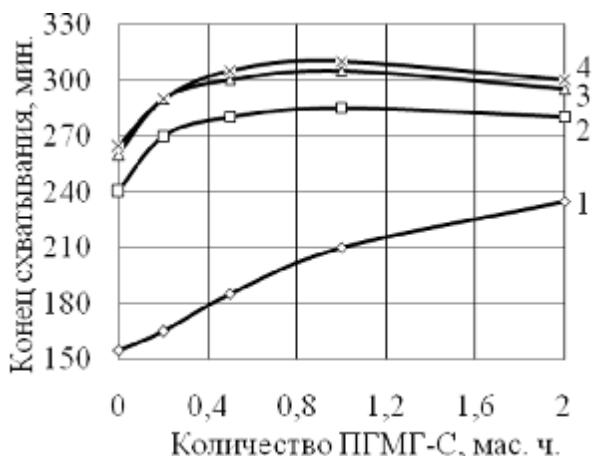
Для полученных цементов экспериментально определялись нормальная густота, сроки схватывания, водоотделение и равномерность изменения объема, прочность и биостойкость цементного камня. Испытания цементных паст твердеющих материалов проведены согласно ГОСТ 310.1-76, 310.3-76, 310.6-85. Прочность цементного камня при сжатии определялась на образцах кубиках с размерами 2×2×2 см, изготовленных из раствора нормальной густоты и твердевших в течение 28 суток в нормальных условиях. Количество испытанных образцов обеспечивало точность эксперимента не менее 95 %. Обрастаемость плесневыми грибами образцов цементного камня, изготовленного из теста нормальной густоты определялась по ГОСТ 9.049-91 методами 1 (без дополнительных источников углеродного и минерального питания) и 3 (на твердой питательной среде Чапека–Докса) с установлением соответственно грибостойкости и фунгицидности. Испытывались образцы-балочки с размерами 1×1×3 см, которые перед испытанием твердели 28 суток в нормально-влажностных условиях.

Цемент – уникальный строительный материал, свойства которого зависят не только от физико-химических особенностей самого вяжущего, но и от содержания и качества сопутствующих материалов (вода, добавки, песок и др.). Количество воды для затворения напрямую влияет практически на все свойства будущего материала (прочность, морозостойкость и т.п.) [8, 16]. Испытаниями выявлено, что нормальная густота цементного теста, модифицированного ПГМГ–С, равномерно увеличивается с 24 % для контрольного состава до 25 % при 2 мас. ч. ПГМГ–С на 100 мас. ч. клинкера. Содержание двуводного гипса в пределах от 0 до 6 мас. ч. на 100 мас. ч. клинкера не влияет на нормальную густоту модифицированного цементного теста. Данная особенность объясняется гидрофобными свойствами биоцидной добавки, приводящими к увеличению количества воды для смачивания зерен цемента. Следовательно, использование ПГМГ–С в качестве биоцидной добавки в цементе не приводят к увеличению нормальной густоты цементного теста выше максимально рекомендуемых 28 %, что свидетельствует о пригодности применения данного препарата при производстве цемента.

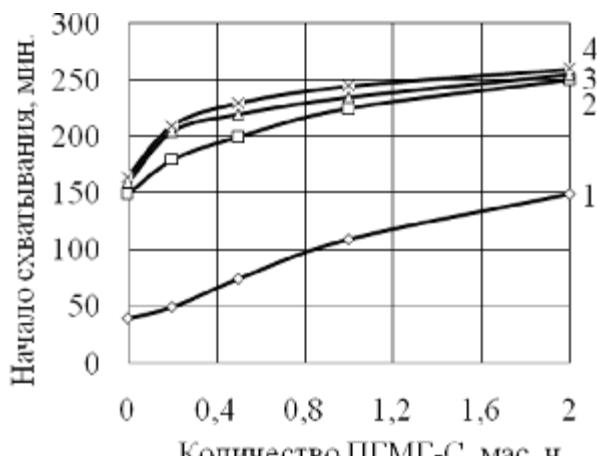
Производство строительных материалов, изделий и конструкций на основе цементных вяжущих характеризуется потребностью в цементах с разным химико-минералогическим составом, классом по прочности, сроками схватывания и т.п. Например, для получения дорожных покрытий необходимы цементы, твердение которых начинается не ранее двух часов после затворения, а для декоративных покрытий – не ранее 30 минут [8].

Влияние количественного содержания полигексаметиленгуанидин-стеарата на сроки схватывания цементного теста нормальной густоты представлено на рисунке 1.

а)



б)



**Рисунок 1 – Влияние содержания  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и ПГМГ-С на начало (а) и конец схватывания (б) цемента:**  
 1 – 100 мас. ч. клинкера; 2 – то же с 2 мас. ч.  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ;  
 3 – то же с 4 мас. ч.  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; 4 – то же с 6 мас. ч.  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Из данных рисунка 1 видно, что рассматриваемая биоцидная добавка замедляет процесс схватывания модифицированного цементного теста. Данное явление объясняется органической природой вводимого препарата. Авторами [8] было выдвинуто три гипотезы замедляющего действия препаратов органической природы: первая основана на адсорбции органических препаратов на поверхности зерен цемента, препятствующая его схватыванию; вторая – характеризуется осаждением на безводных фазах продуктов взаимодействия кальций-ионов с органическими веществами, что и является причиной торможения гидратации цемента; третья – основана на формировании комплексов органических веществ, содержащих одну или более кислородосодержащих функциональных групп с кальций-, алюминий-, железо- и силикат-ионами, которые играют важную роль в механизме замедления схватывания цемента.

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно выделить допустимые пределы содержания ПГМГ-С и  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , в биоцидном цементе обеспечивающие начало схватывания цемента не ранее 45 минут и конец схватывания не позднее 10 часов: 100 мас. ч. клинкера, 0–6 мас. ч.  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 0–2 мас. ч. ПГМГ-С.

Проведены исследования по оценке равномерность изменения объема разработанного биоцидного цемента. По результатам проведенных исследований установлено, что изменение объема цементного камня при содержании: 100 мас. ч. клинкера, 0–6 мас. ч.  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 0–2 мас. ч. ПГМГ-С в пределах допустимых значений.

Важными для цементов являются вопросы, связанные с сохранением их свойств во времени. Длительные сроки хранения характерны для гидрофобных цементов. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о наличие гидрофобных свойств у цемента, модифицированного биоцидным препаратом ПГМГ-С в количестве от 0,2–2 мас. ч. на 100 мас. ч. клинкера. Данная особенность также объясняется органической природой добавки, молекулы которой не поляризованы.

Водоотделение для разработанных цементов не устанавливалось в силу следующих причин. Во-первых, водоотделение цемента, модифицированного ПГМГ-С, невозможно определить по ГОСТ 310.6–85 из-за гидрофобной особенности данного материала. Во-вторых, в этом нет особой необходимости, так как для композитов, изготовленных на гидрофобных цементах свойственна нерасслаиваемость, хорошая транспортируемость смеси и незначительная усадка композитов.

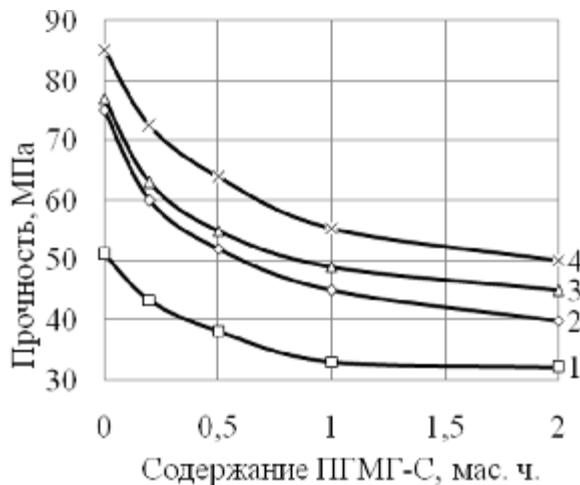


Рисунок 2 – Влияние содержания  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и ПГМГ-С на прочность при сжатии цементного камня: 1 – 100 мас. ч. клинкера;

2 – то же с 2 мас. ч.  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ;

3 – то же с 4 мас. ч.  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ;

4 – то же с 6 мас. ч.  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Прочность является важным физико-механическим свойством цементного камня, которая в первую очередь повлияет на прочностные характеристики растворов и бетонов, изготовленных из него. Многие исследователи приводят разные факторы, определяющие прочность цементного камня: состав и микроструктура клинкера, количество гипса, удельная поверхность цемента, в/ц отношение, условия твердения, возраст, количество и характер вводимых добавок и др. [8]. Представляет значительный интерес установление добавочных компонентов на прочность. Влияние содержания биоцидной добавки ПГМГ-С на прочность при сжатии цементного камня представлено на рисунке 2.

Как показывают полученные результаты, цементный камень, модифицированный ПГМГ-С, имеет меньшую прочность по сравнению с контрольными составами на 15–20 % при содержании добавки в количестве 0,2 мас. ч. на 100

мас. ч. клинкера, на 20–25 % при содержании добавки в количестве 0,5 мас. ч. на 100 мас. ч. клинкера и на 30–45 % при содержании добавки в количестве 1–2 мас. ч. на 100 мас. ч. клинкера. Это объясняется гидрофобной особенностью добавки, как уже было описано выше, замедляющей процесс гидратации цемента.

Разработанный цемент выигрывает по другому важному показателю – биостойкости, т.к. практически все строительные материалы подвержены заражению микроорганизмами, дальнейшее развитие которых обусловлено химическим составом изделий и конструкций, наличием питательной среды извне и многими другими факторами. Наиболее применяемым способом защиты строительных материалов и конструкций от обрастаемости плесневыми грибами является введение в их состав, в процессе изготовления, биоцидных соединений. Все биоцидные препараты по их механизму воздействия на микроорганизмы делятся на 3 группы: окислители, фенолы, ПАВ – влияют на функцию пограничных структур клетки, вызывая ее повреждение; тяжелые металлы, азотистые соединения, спирты – нарушают функцию белков и ферментов; азотная кислота, окись этилена, некоторые антибиотики – реагируют с ДНК [15]. Одной из исключительных характеристик для оценки биостойкости материалов является их обрастаемость микроорганизмами.

Влияние содержания в цементе  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и ПГМГ-С на обрастаемость композитов плесневыми грибами представлено в таблице 1. В результате проведенного исследования установлено, что композиты, изготовленные на связующем, содержащем 100 мас.ч. клинкера, 0–6 мас.ч.  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и 1–2 мас.ч. ПГМГ-С приобретают ярко-выраженные фунгицидные свойства (радиус зоны ингибиции роста грибов 1–3 мм).

По результатам проведенных исследований выделим оптимальные пределы содержания в цементе  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и ПГМГ-С обеспечивающие фунгицидные свойства композитам на их основе: 100 мас.ч. клинкера, 0–6 мас.ч.  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 1–2 мас.ч. ПГМГ-С.

Таблица 1 – Влияние содержания в цементе  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и ПГМГ-С на обрастаемость композита

№ состава	Содержание $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , мас.ч.	Содержание ПГМГ-С, мас.ч.	Оценка роста грибов, в баллах		Характеристика по ГОСТ 9.049-91
			Метод 1	Метод 3	
1	0	0	0	4	Грибостоек
2	2	0	0	4	Грибостоек
3	4	0	0	4	Грибостоек
4	6	0	0	4	Грибостоек
5	0	0,5	0	4	Грибостоек
6	2	0,5	0	3	Грибостоек
7	4	0,5	0	3	Грибостоек
8	6	0,5	0	3	Грибостоек
9	0	1	0	1	Фунгициден
10	2	1	0	0(0 мм)	Фунгициден
11	4	1	0	1	Фунгициден
12	6	1	0	1	Фунгициден
13	0	2	0	0(1 мм)	Фунгициден
14	2	2	0	0(3 мм)	Фунгициден
15	4	2	0	0(3 мм)	Фунгициден
16	6	2	0	0(3 мм)	Фунгициден

В скобках приведен радиус зоны ингибиования роста грибов  $R$ , мм

Таким образом, в результате проведения экспериментальных исследований получены зависимости изменения основных физико-механических и технологических свойств цементов и композитов на их основе от количественного содержания полигексаметиленгуанидин-стеарата. Даны рекомендации по дозировкам ПГМГ-С, придающего фунгицидные свойства цементным композитам при обеспечении величин показателей физико-механических свойств, соответствующих требованиям ГОСТ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны: научное издание [Текст] / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М. : Изд-во АСВ, 2006. – 368 с.
2. Ерофеев, В.Т. Влияние модифицирующих добавок на стойкость цементных композитов в условиях воздействия модельной бактериальной среды [Текст] / В.Т. Ерофеев, С.В. Казначеев, А.Д. Богатов, В.А. Спирин, Д.А. Светлов, С.Н. Богатова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2012. – № 26. – С. 103–107.
3. Ерофеев, В.Т. Исследование стойкости цементных композитов, модифицированных биоцидными препаратами на основе гуанидина, в модельной среде мицелиальных грибов [Текст] / В.Т. Ерофеев, С.В. Казначеев, А.Д. Богатов, В.А. Спирин, Д.А. Светлов, С.Н. Богатова // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. – 2012. – № 1 (20).
4. Ерофеев, В.Т. Влияние модифицирующих добавок на стойкость цементных композитов в условиях воздействия модельной бактериальной среды [Текст] / В.Т. Ерофеев, С.В. Казначеев, А.Д. Богатов, В.А. Спирин, Д.А. Светлов, С.Н. Богатова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2012. – № 26. – С. 103–107.
5. Ерофеев, В.Т. Защита зданий и сооружений от биоповреждений биоцидными препаратами на основе гуанидина [Текст] / В.Т. Ерофеев, П.Г. Комохов, В.Ф. Смирнов, Д.А. Светлов, С.В. Казначеев, А.Д. Богатов, Е.А. Морозов, О.Д. Васильев, Ю.М. Макаревич, В.А. Спирин, Н.А. Пацюк. – СПб.: Наука, 2009. – 192 с.

6. Ерофеев, В.Т. Биостойкость декоративных цементных композитов [Текст] / В.Т. Ерофеев, А.И. Родин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 32-38.
7. Ерофеев, В.Т. Биоцидный портландцемент с улучшенными физико-механическими свойствами [Текст] / В.Т. Ерофеев, А.И. Родин, А.Д. Богатов, С.В. Казначеев, В.Ф. Смирнов, Е.Н. Сураева, М.А. Родина // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 8, Issue 3. – М. : Изд-во АСВ. – Нью-Йорк : Изд-во Begell House Inc., 2012. – С. 81–92.
8. Ерофеев, В.Т. Физико-механические свойства и биостойкость цементов, модифицированных сернокислым натрием, фтористым натрием и полигексаметиленгуанидин стеаратом [Текст] / В.Т. Ерофеев, А.И. Родин, А.Д. Богатов, С.В. Казначеев, В.Ф. Смирнов, Д.А. Светлов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 7-2. – С. 292-310.
9. Ерофеев, В.Т. Исследование биостойкости наполненных цементных композитов в лабораторных и натуральных условиях [Текст] / В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов, Э.М. Балатханова, Е.А. Митина, А.Д. Богатов, С.В. Казначеев, О.Н. Смирнова, А.И. Родин, Е.А. Варченко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 1. С. 41-47.
10. Каприлов, С.С. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. Часть II. [Текст] / С.С. Каприлов, В.И. Травуш, Н.И. Карпенко, А.В. Шейдфельд, Г.С. Кардумян, Ю.А. Кисилева, О.В. Пригоженко // Строительные материалы. – 2008. – № 3. – С. 9-13.
11. Родин, А. И. Разработка биоцидных цементов и композитов на их основе [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Родин Александр Иванович; [Место защиты: Пенз. гос. ун-т архитектуры и стр-ва] - Пенза, 2013 - 24 с.
12. Родин, А.И. Кинетика набора прочности биоцидных цементов [Текст] / В.Т. Ерофеев, А.И. Родин, А.П. Пустовгар, А.В. Еремин, С.А. Пашкевич, А.Д. Богатов, С.В. Казначеев, А.О. Адамцевич // Вестник МГСУ. – 2014. – № 12. – С. 88-97.
13. Родин, А.И. Повышение биостойкости цементных композитов с помощью препарата «Ультрадез-Био» [Текст] / А.И. Родин, С.Н. Карпушин, Б.В. Боцьев, Э.М. Балатханова, В.Ф. Смирнов, В.Т. Ерофеев // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9-9. – С. 1946-1950.
14. Светлов, Д.А. Физико-технические свойства цементных композитов с биоцидной добавкой «Тефлекс» [Текст] / Д.А. Светлов, В.А. Спирина, С.В. Казначеев, А.Д. Богатов, А.С. Борискин, В.Т. Ерофеев // Транспортное строительство. – 2008. – №2. – С. 21–23.
15. Соломатов, В.И. Биологическое сопротивление материалов [Текст] / В.И. Соломатов, В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов, А.С. Семичева, Е.А. Морозов. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. - 196 с.
16. Тейлор, Х. Химия цемента [Текст]: пер. с англ. – М. : Мир, 1996. – 560 с.

**В.Т. Ерофеев**

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, г. Саранск

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой строительных материалов и технологий

E-mail: [yerofeevv@mail.ru](mailto:yerofeevv@mail.ru)

**А.И. Родин**

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, г. Саранск

Кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов и технологий

E-mail: [AL\\_Rodin@mail.ru](mailto:AL_Rodin@mail.ru)

**Е.Н. Сураева**

Проектный институт «Мордовгражданпроект», г. Саранск

Кандидат технических наук, ведущий инженер

E-mail: [suraevaen@yandex.ru](mailto:suraevaen@yandex.ru)

**А.Д. Богатов**

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, г. Саранск

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий

E-mail: [bogatovad@list.ru](mailto:bogatovad@list.ru)

**С.В. Казначеев**

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, г. Саранск

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий

E-mail: [kaznacheevsv@rambler.ru](mailto:kaznacheevsv@rambler.ru)

## BIOCIDAL PORTLAND CEMENT

*The results of experimental research of technological and physico-mechanical properties of cement modified by polyhexamethyleneguanidines-stearate (PGMG-S); the quantitative dependence of changes in water separation, setting time, normal density, uniform volume changes of cement pastes and compressive strength of cement stone on the number of biocidal additives; presents the research results of cement composites modified PGMG-S, on contamination; the optimum dosage of the components of the biocidal Portland cement.*

**Keywords:** biocide cement, physical properties, contamination, biocide additive.

## BIBLIOGRAPHY

1. Bazhenov, YU.M. Modifitsirovannyye vysokokachestvennyye betony: nauchnoye izdaniye [Tekst] / YU.M. Bazhenov, V.S. Dem'yanova, V.I. Kalashnikov. – M. : Izd-vo ASV, 2006. – 368 s.
2. Yerofeyev, V.T. Vliyaniye modifitsiruyushchikh dobavok na stoykost' tsementnykh kompozitov v usloviyakh vozdeystviya model'noy bakterial'noy sredy [Tekst] / V.T. Yerofeyev, S.V. Kaznacheyev, A.D. Bogatov, V.A. Spirin, D.A. Svetlov, S.N. Bogatova // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2012. – № 26. – S. 103–107.
3. Yerofeyev, V.T. Issledovaniye stoykosti tsementnykh kompozitov, modifitsirovannyykh biotsidnymi preparatami na osnove guanidina, v model'noy srede mitselial'nykh gribov [Tekst] / V.T. Yerofeyev, S.V. Kaznacheyev, A.D. Bogatov, V.A. Spirin, D.A. Svetlov, S.N. Bogatova // Internet-Vestnik VolgGASU. – 2012. – № 1 (20).
4. Yerofeyev, V.T. Vliyaniye modifitsiruyushchikh dobavok na stoykost' tsementnykh kompozitov v usloviyakh vozdeystviya model'noy bakterial'noy sredy [Tekst] / V.T. Yerofeyev, S.V. Kaznacheyev, A.D. Bogatov, V.A. Spirin, D.A. Svetlov, S.N. Bogatova // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2012. – № 26. – S. 103–107.
5. Yerofeyev, V.T. Zashchita zdaniy i sooruzheniy ot biopovrezhdeniy biotsidnymi preparatami na osno-ve guanidina [Tekst] / V.T. Yerofeyev, P.G. Komokhov, V.F. Smirnov, D.A. Svetlov, S.V. Kaznacheyev, A.D. Bogatov, Ye.A. Morozov, O.D. Vasil'yev, YU.M. Makarevich, V.A. Spirin, N.A. Patsyuk. – SPb.: Nauka, 2009. – 192 s.
6. Yerofeyev, V.T. Biostoykost' dekorativnykh tsementnykh kompozitov [Tekst] / V.T. Yerofeyev, A.I. Rodin // Regional'naya arkitektura i stroitel'stvo. – 2013. – № 3. – S. 32–38.
7. Yerofeyev, V.T. Biotsidnyy portlandtsement s uluchshennymi fiziko-mekhanicheskimi svoystvami [Tekst] / V.T. Yerofeyev, A.I. Rodin, A.D. Bogatov, S.V. Kaznacheyev, V.F. Smirnov, Ye.N. Surayeva, M.A. Rodina // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, Volume 8, Issue 3. – M. : Izd-vo ASV. – N'yu-York : Izd-vo Begell House Inc., 2012. – S. 81–92.
8. Yerofeyev, V.T. Fiziko-mekhanicheskiye svoystva i biostoykost' tsementov, modifitsirovannyykh serno-kislym natriyem, ftoristym natriyem i poligeksametilenguanidin stearatom [Tekst] / V.T. Yerofeyev, A.I. Rodin, A.D. Bogatov, S.V. Kaznacheyev, V.F. Smirnov, D.A. Svetlov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2013. – № 7-2. – S. 292–310.
9. Yerofeyev, V.T. Issledovaniye biostoykosti napolnennykh tsementnykh kompozitov v laboratornykh i naturnykh usloviyakh [Tekst] / V.T. Yerofeyev, V.F. Smirnov, E.M. Balatkhanova, Ye.A. Mitina, A.D. Bogatov, S.V. Kaznacheyev, O.N. Smirnova, A.I. Rodin, Ye.A. Varchenko // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova. 2015. № 1. S. 41–47.
10. Kapriyelov, S.S. Modifitsirovannyye vysokoprochnyye betony klassov V80 i V90 v monolitnykh konstruktsiyakh. Chast' II. [Tekst] / S.S. Kapriyelov, V.I. Travush, N.I. Karpenko, A.V. Sheydfel'd, G.S. Kardumyan, YU.A. Kisileva, O.V. Prigozhenko // Stroitel'nyye materialy. – 2008. – № 3. – S. 9–13.
11. Rodin, A. I. Razrabotka biotsidnykh tsementov i kompozitov na ikh osnove [Tekst]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / Rodin Aleksandr Ivanovich; [Mesto zashchity: Penz. gos. un-t arkhitektury i str-va] - Penza, 2013 - 24 s.
12. Rodin, A.I. Kinetika nabora prochnosti biotsidnykh tsementov [Tekst] / V.T. Yerofeyev, A.I. Rodin, A.P. Pustovgar, A.V. Yeremin, S.A. Pashkevich, A.D. Bogatov, S.V. Kaznacheyev, A.O. Adamtsevich // Vestnik MGSU. – 2014. – № 12. – S. 88–97.
13. Rodin, A.I. Povysheniye biostoykosti tsementnykh kompozitov s pomoshch'yu preparata «Ul'tradez-Bio» [Tekst] / A.I. Rodin, S.N. Karpushin, B.V. Botsiyev, E.M. Balatkhanova, V.F. Smirnov, V.T. Yerofeyev // Fundamental'nyye issledovaniya. – 2014. – № 9-9. – S. 1946–1950.
14. Svetlov, D.A. Fiziko-tehnicheskiye svoystva tsementnykh kompozitov s biotsidnoy dobavkoy «Te-fleks» [Tekst] / D.A. Svetlov, V.A. Spirin, S.V. Kaznacheyev, A.D. Bogatov, A.S. Boriskin, V.T. Yerofeyev // Trans-portnoye stroitel'stvo. – 2008. – № 2. – S. 21–23.

15. Solomatov, V.I. Biologicheskoye soprotivleniye materialov [Tekst] / V.I. Solomatov, V.T. Yerofeyev, V.F. Smirnov, A.S. Semicheva, Ye.A. Morozov. – Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2001. - 196 s.
16. Teylor, KH. Khimiya tsementa [Tekst]: per. s angl. – M. : Mir, 1996. – 560 s.

**V. Erofeev**

Ogarev Mordovia State University, Saransk

Doctor of technical sciences, Professor, Head of building materials and technologies department and technologies department

E-mail: [verofeevvt@mail.ru](mailto:verofeevvt@mail.ru)

**A. Rodin**

Ogarev Mordovia State University, Saransk

Candidate of technical sciences, associate professor of building materials and technologies department

E-mail: [AL\\_Rodin@mail.ru](mailto:AL_Rodin@mail.ru)

**E. Suraeva**

Design Institute "Mordovgrazhdanproekt", Saransk

Candidate of technical sciences, Senior Engineer

E-mail: [suraevaen@yandex.ru](mailto:suraevaen@yandex.ru)

**A. Bogatov**

Ogarev Mordovia State University, Saransk

Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of building materials and technologies department

E-mail: [bogatovad@list.ru](mailto:bogatovad@list.ru)

**S. Kaznacheev**

Ogarev Mordovia State University, Saransk

Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of building materials and technologies department

E-mail: [kaznacheevsv@rambler.ru](mailto:kaznacheevsv@rambler.ru)

ПЛОТНИКОВ В.В., БОТАГОВСКИЙ М.В., ПЛОТНИКОВА С.В.

## ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОНОЛИТНОГО БЕТОНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

В статье представлены результаты исследований по разработке энерго- и ресурсосберегающей технологии возведения многослойных наружных стен в монолитном домостроении с использованием многокомпонентных цементных пенобетонов низкой плотности и теплопроводности. Технология предусматривает приготовление непосредственно на строительной площадке пенобетона, основными компонентами которого являются цемент и тонкодисперсные промышленные отходы, предварительно активированные в жидкой среде. Показано, что полученный монолитный пенобетон имеет высокие эксплуатационные показатели и может быть рекомендован для использования в энергоэффективных ограждающих конструкциях зданий.

**Ключевые слова:** многослойные ограждающие конструкции, тепловая защита зданий, монолитный пенобетон, теплопроводность, механохимическая активация, активация в жидкой среде, тонкодисперсные промышленные отходы.

Монолитный бетон низкой плотности в последнее время находит все более широкое применение как высокоэффективный строительный материал, применяемый в ограждающих многослойных стеновых конструкциях малоэтажных и многоэтажных зданий. Этому способствуют как высокие эксплуатационные и теплоизоляционные характеристики, так и технико-экономические преимущества бетонов низкой плотности по сравнению с традиционными теплоизоляционными материалами.

В Брянском государственном инженерно-технологическом университете разработана интенсивная ресурсосберегающая технология получения высококачественного неавтоклавного теплоизоляционного бетона на основе активированных промышленных отходов и цемента. Технология предусматривает получение бетонов низкой плотности непосредственно на строительной площадке с использованием для активации в жидкой среде цемента и тонкодисперсных промышленных отходов (зол ТЭС, опилок, костры, отходов целлюлозно-бумажной промышленности, скопа, керамзитовой пыли, микрокремнезема, нефелинового шлама, асбестита и т.д.) роторно-пульсационных аппаратов (РПА) (рис. 1).

Полученные бетоны низкой плотности на основе активированных композиций могут наноситься на наружную поверхность стены методом торкретирования или подаваться механизированным способом внутрь опалубки или кирпичной пустотелой стены (рис. 2).

Удельная поверхность цемента и промышленных отходов при обработке в РПА повышается до 4500-8000 см<sup>2</sup>/г, что значительно повышает их активность и интенсифицирует процесс твердения бетонов низкой плотности, особенно в ранние сроки. Это, в свою очередь, позволяет значительно повысить эксплуатационные свойства теплоизоляционного неавтоклавного бетона и эффективно применять его в монолитном домостроении. Начальная более плотная упаковка, высокая дисперсность новообразований в образцах на активированном цементе благоприятствуют формированию плотной и прочной микроструктуры межпоровых стенок ячеистых бетонов и контактов между заполнителями бетона низкой плотности.

В качестве примера, свидетельствующем о высокой эффективности механохимической активации в РПА, на рисунке 3 приведены данные по изменению удельной поверхности и гранулометрического состава золы ТЭС в процессе ее гидродинамической обработки, а на рисунке 4 электронномикроскопические исследования структуры зольных частиц до и после активации. Активация цементно-зольного теста приводит к повышению удельной поверхности компонентов, появлению большого количества дефектов структуры цементных и зольных ча-

стиц, увеличению числа микродисперсных гидратных новообразований, обладающих хорошо развитой поверхностью и являющихся зародышами и подложками кристаллизации. Все это ускоряет образование гидросиликатов кальция и других продуктов гидратации цемента, увеличивает число коагуляционных и адгезионных контактов и ведет к повышению прочности твердеющей структуры. Повышение эксплуатационных свойств многокомпонентных вяжущих композиций на основе различных отходов путем их механохимической активации в жидкой среде нами отмечалось в ранее опубликованных статьях и монографиях [1,2,3].

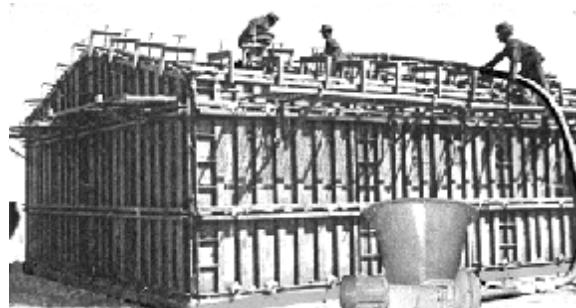
Целью исследований, приведенных в данной статье, являлось подтверждение высоких эксплуатационных свойств теплоизоляционных бетонов, полученных непосредственно на строительной площадке при возведении ограждающих конструкций жилых малоэтажных зданий.

Ниже представлены результаты опытно-промышленного испытания интенсивной ресурсосберегающей технологии, предусматривающей получение бетонов низкой плотности непосредственно на строительной площадке и их использование при устройстве ограждающих конструкций жилых малоэтажных зданий.

а)



б)



*Рисунок 1 – Использование мобильных установок для приготовления активированных вяжущих композиций при возведении ограждающих конструкций строительных объектов: а) с применением стено-вой щитовой опалубки; б) то же, общий вид объекта строительства*

а)



б)



*Рисунок 2 – Нанесение бетона низкой плотности: а) на поверхность стены (опалубки); б) подача внутрь кирпичной стены с помощью гибкого шланга*

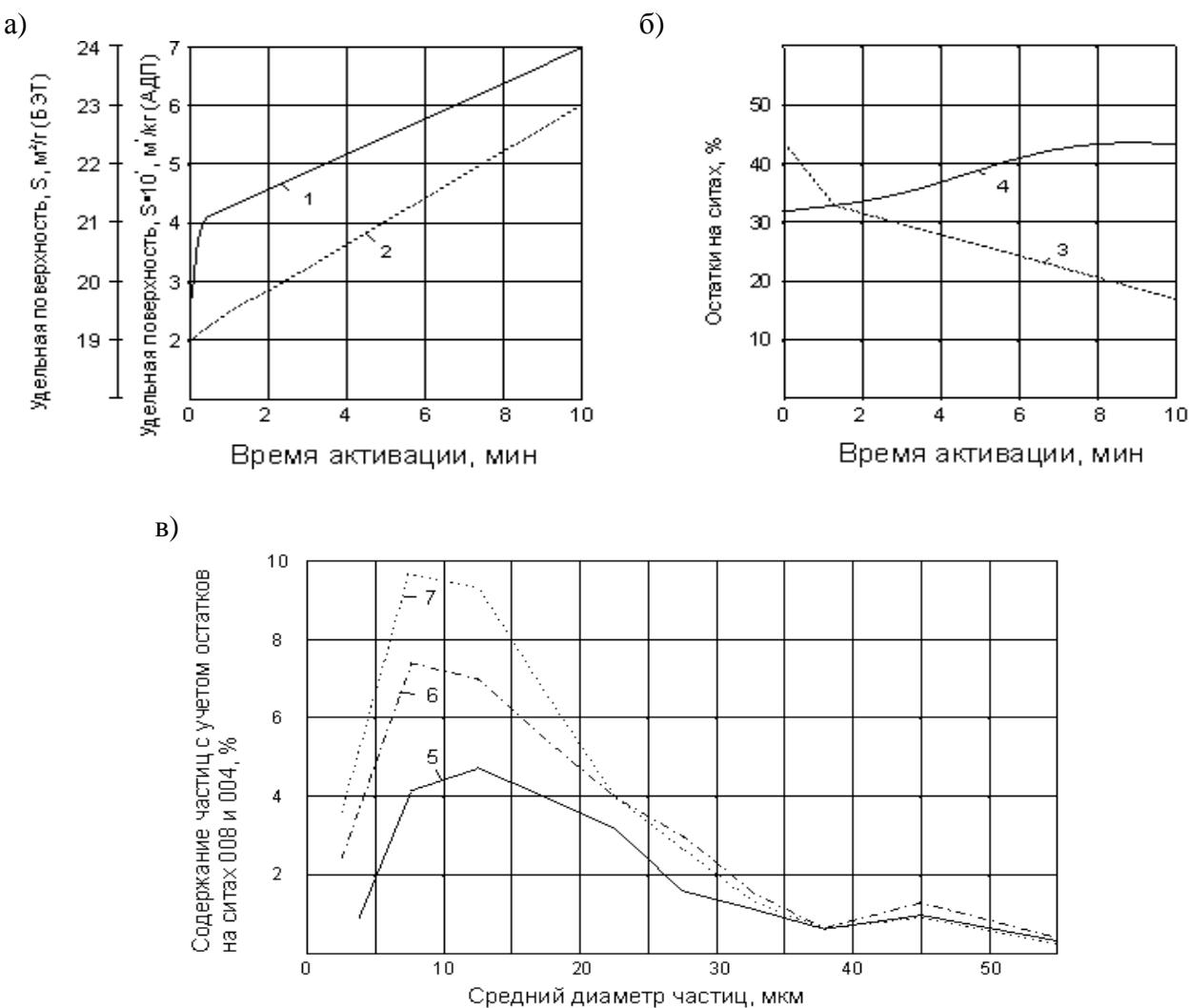


Рисунок 3 – Изменение удельной поверхности (а), остатков на ситах (б) и гранулометрического состава (в) золы ТЭС при активации в РПА: 1 – удельная поверхность (АДП); 2 – удельная поверхность (БЭТ); 3 – остаток на сите 008; 4 – остаток на сите 004; 5 – зола ТЭС, контрольная; 6 – зола, активированная в РПА в течение 3 мин; 7 – зола, активированная в РПА в течение 10 мин

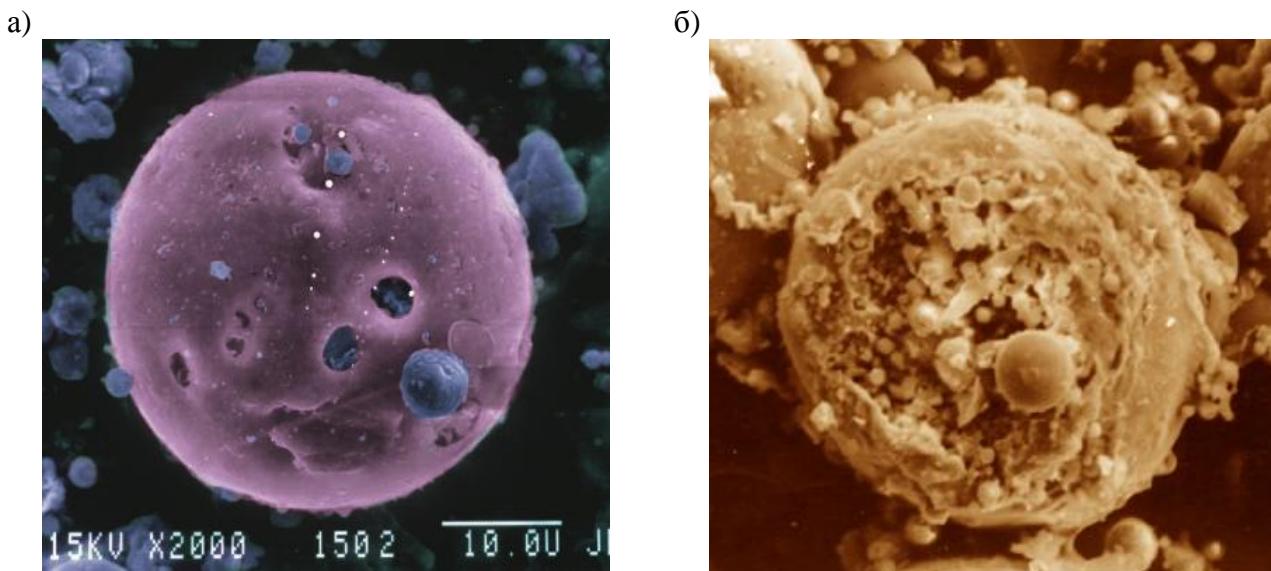


Рисунок 4 – Частица золы: а) до активации в РПА; б) после активации в РПА

**Устройство монолитных ограждающих конструкций с использованием теплоизоляционного пенобетона.** В производственных условиях теплоизоляционный пенобетон готовился на основе многокомпонентной вяжущей композиции с использованием вышеуказанных отходов и портландцемента Брянского цементного завода.

Регулирование свойств пенобетона осуществлялось путем подбора состава компонентов, оптимизации режимов активации и других технологических переделов в процессе приготовления, подачи и укладки смесей. Технологическая схема приготовления, подачи и укладки пенобетона выглядела следующим образом: в начале с помощью активатора-смесителя готовилась пена необходимой кратности и перекачивалась в дополнительную емкость объемом 5 м<sup>3</sup>, затем одновременно с пеной в активатор-смеситель подавались вяжущие и тонкодисперсные промышленные отходы, где производилась их обработка в режиме высокоимпульсной гидродинамической активации в течение нескольких минут; после доведения пенобетона до необходимой кондиции активатор-смеситель переключался из режима активации в режим перекачки смеси, которая по резиновому шлангу подавалась в опалубку.

На стадии приготовления и укладки отбирались пробы пенобетона для исследования его свойств (подвижность, удельная плотность, содержание воздушных пор и водоудерживающая способность).

Определение подвижности пенобетона определялось по стандартной методике по расплыву конуса на встряхивающем столике. Для определения других показателей также использовались стандартные методики с небольшими изменениями с учетом отказа от встряхивания и уплотнения свежеприготовленного пенобетона.



**Рисунок 5 – Зависимость кратности пены от вида смесителя и времени перемешивания:**  
1- перемешивание в стандартном смесителе, скорость вращения ротора – 450 об/мин;  
2,3 - перемешивание в РПА со скоростью вращения ротора 1500 об/мин и 3000 об/мин соответственно

При исследовании затвердевшего пенобетона было установлено повышение его прочностных характеристик и морозостойкости при увеличении времени активации компонентов.

Строительно-технические свойства пенобетона с использованием скопа и золы ТЭС приведены в табл. 1.

Для исследования адгезионных характеристик теплоизоляционных пенобетонов изготавливались лабораторные образцы, а также извлекались керны из экспериментальной стены, которая моделировала процесс твердения пенобетона в условиях колодцевой кирпичной кладки из силикатного и керамического кирпича. Изучались изменения массы, линейные деформации и прочность на сцепление. Контактная зона между пенобетоном и естественным камнем изучалась визуально и микроскопическим методом.

Анализ характеристик полученных пен показал, что кратность и устойчивость пен возрастает с увеличением продолжительности их активации в РПА (рис. 5).

Контроль свойств свежего пенобетона на строительном объекте производился путем определения его удельной плотности. С учетом того, что плотность готового пенобетона до и после перекачки и укладки различна, так как часть пор всегда разрушается при движении по резиновому шлангу, контроль плотности осуществляется при укладке пенобетона в опалубку.

Электронно-микроскопические исследования структуры пенобетона показали содержание многочисленных замкнутых пор в затвердевшем вяжущем. Большая часть воздушных пор имеет размеры от 20 мкм до 300 мкм и относится к группе воздушных микропор.

Таблица 1 - Физико-механические характеристики активированного пенобетона

№	Состав, кг/м <sup>3</sup>					Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	Подвижность, см	Коэффициент теплопроводности, Вт/мК	Предел прочности при сжатии, МПа
	цемент	скоп	вода	пекон-цетрат	зола				
1.	114	56	152	1,5	-	322	200	17	0,0582
2.	270	67	289	1,5	-	626	400	13	0,0585
3.	300	75	320	1,5	-	695	450	15	0,0676
4.	284	142	511	1,3	-	937	500	14	0,071
5.	318	159	430	1,3	-	907	560	16	0,082
6.	376	225	592	1,2	-	1193	700	11	0,089
7.	427	257	683	1,2	-	1367	800	10	0,093
8.	248	25	190	1,5	62	525	400	15	0,0846
9.	228	57	189	1,5	57	589	400	14	0,0713
10.	200	134	240	1,5	52	626	440	12	0,075
									0,50

Результаты исследований показали, что прочность сцепления пенобетона силикатным и керамическим кирпичом находится в пределах 0,3-0,7 кг/см<sup>2</sup>.

С учетом проведенных исследований были разработаны рекомендуемые составы для приготовления пенобетонов с использованием промышленных отходов для возведения монолитных самонесущих конструкций или заполнения облегченных кирпичных кладок и железобетонных перекрытий в качестве теплоизоляционного материала. В таблице 2 представлены рекомендуемые составы пенобетона на основе активированных цемента и скопа.

Таблица 2 – Рекомендуемые составы пенораствора на основе цемента и скопа

Состав, кг			Контролируемые параметры		
Цемент	Заполнитель	Вода с пенообразователем	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность, кг/см <sup>2</sup>	Подвижность, О.К., см
240	80	260-340	345-365	3,2-4,5	8-20
320	80	260-340	435-460	5,2-6,0	12-18
340	170	580-620	530-570	5,5-6,5	16-18
350	170	460	550-570	9,0-10,5	8-10
450	210	780	740	18,5	10

**Устройство ограждающих конструкций из ячеистого скопобетона переменной плотности.** При строительстве одноэтажного жилого дома из монолитного бетона вместо наружных стен из керамзитобетона толщиной 75 см были выполнены трехслойные монолитные стены с наружными слоями из тяжелого бетона и внутренним слоем из активированного ячеистого скопобетона.

Для получения активированного ячеистого скопобетона объемной массой 300-600 кг/м<sup>3</sup> непосредственно на строительной площадке использовалась мобильная установка для активации и диспергирования материалов – активатор-смеситель АС-3.

Для повышения прочности, водонепроницаемости и ускорения твердения монолитного ячеистого бетона, цемент совместно с модификаторами и заполнителями (кристаллизационные компоненты, зола ТЭС, ПАВ) предварительно обрабатывался в АС-3 в жидкой среде.

Для формования стеновых панелей переменной плотности использовались горизонтальные формы, разложенные по контуру здания. Вначале в горизонтальные формы размером

2,8 м ´ 3,0 м после установки каркаса здания укладывался слой модифицированного тяжелого бетона толщиной 180 мм, затем теплоизоляционный слой толщиной 200 мм из пенобетона переменной плотности (300-600 кг/м<sup>3</sup>). Защитный слой выполнялся толщиной 20 мм из самовыравнивающейся полимерцементной композиции, приготовленной в роторно-пульсационном аппарате (РПА). Составы бетонов для каждого слоя приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Составы бетонов для трехслойной монолитной панели переменной плотности

№ слоя	Расход материалов на 1м <sup>3</sup> смеси, кг									
	Це-мент	Песок	Ще-бень	Вода	Скоп	Пено-кон-цент-рат	Крент	Латекс	С-3	Ускори-тель твердения
1	290	728	1196	180	-	-	1,5	-	1,5	4
2	270	-	-	285	70	1,5	-	-	-	0,5
3	450	1200	-		-	-	1,5	40	2,0	3

Одновременно с подачей бетона в горизонтальную форму изготавливались контрольные образцы размером 15 ´ 15 ´ 15 см для контроля качества и физико-механических характеристик бетонов (таблица 4).

Таблица 4- Физико-механические характеристики бетонов

№ слоя	Толщина, мм	Предел прочности при сжатии, МПа, через			Прочность образцов, МПа размером 15 ´ 15 ´ 15 см из бетонов аналогичного состава, но без предварительной активации компонентов в РПА, через		
		3 суток	7 суток	28 суток	3 суток	7 суток	28 суток
1	180	10,2	16,1	25,1	5,1	10,0	16,0
2	200	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-1,2	-	0,1-0,2	0,2-0,3
3	20	22,0	45,0	72,0	6,1	18	42,0

Через 2-3 суток панели переводились в вертикальное положение с временным креплением специальным кондуктором для обеспечения устойчивости. Панели по контуру соединялись между собой с помощью специального замка с замоноличиванием стыков безусадочными композициями.

Технология устройства ограждающих конструкций в горизонтальных формах с последующим их переводом в вертикальное положение показала ряд преимуществ перед стандартной технологией возведения монолитных стен:

1. Использование горизонтальных форм для изготовления монолитных панелей упрощает процесс подачи и укладки бетона;
2. Отпадает необходимость в использовании стандартной вертикальной металлической опалубки, процесс установки и обслуживания которой требует больших затрат.
3. Формование панелей в горизонтальном положении позволяет получать внутреннюю и внешнюю поверхность высокого качества и снизить затраты на декоративную отделку фасадной части ограждающей конструкции.
4. Технология позволяет получить бетонную панель переменной плотности, что при вертикальном бетонировании невозможно.

**Устройство энергоэффективных кирпичных стен с использованием теплоизоляционных пенобетонов.** При строительстве одноэтажного жилого дома вместо сплошных кирпичных стен, предусмотренных по проекту, были выполнены комбинированные трехслойные кирпичные стены в следующем конструктивном исполнении:

- несущий слой из силикатного кирпича толщиной 250 мм (1 кирпич) с выступающими на 15 см анкерами для крепления опалубки;
- наружний теплоизоляционный слой из ячеистого бетона толщиной 15 см на основе костры и цемента;
- наружный декоративный слой из механохимически активированных тонкодисперсных промышленных отходов.

Теплоизоляционный слой из ячеистого бетона плотностью 300-400 кг/м<sup>3</sup> укладывался в опалубку механизированным способом с помощью РПА по резиновому шлангу в процессе возведения кирпичных стен.

Приготовление ячеистого бетона осуществлялось в мобильном активаторе-смесителе. Одновременно с укладкой теплоизоляционного слоя формировались образцы размером 15' 15' 15 см для контроля качества ячеистого бетона и определения его физико-механических характеристик. Состав ячеистого бетона и его характеристики приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Состав и физико-механические характеристики теплоизоляционного пенобетона с использованием костры

Состав, кг/м <sup>3</sup>				Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		Теплопроводность, Вт/мК		Прочность, МПа
Цемент	Костра	вода	Пено-концентрат	после приготовления	в сухом состоянии	при влажности 15%	в сухом состоянии	
170	100	150	1,6	420	330	0,11	0,089	0,43

После устройства теплоизоляционного слоя на высоту этажа производилось нанесение декоративного защитного слоя по предварительно установленной пластиковой сетке с малой ячейкой. Декоративный защитный слой выполнялся из механоактивированных цементных композиций с включением тонкодисперсных промышленных отходов, содержащих карбонаты магния и кальция, оксиды железа, хрома, бария или на основе жидкого стекла с включением сульфатов бария, кремнефтористого натрия и добавок для регулирования прочностных, радиационно-защитных и других свойств защитного слоя.

При температуре 20-25°C установлено снижение влажности внутреннего теплоизоляционного слоя стены через 28 суток с 30% до 10-15% за счет отсоса воды силикатным кирпичом и предусмотренных в стене отверстий для вентиляции. При твердении внутреннего слоя наблюдалось хорошее сцепление с кирпичной кладкой, особенно в местах растворных швов. Применение интенсивной ресурсосберегающей технологии при возведении трехслойной кирпичной стены по сравнению с традиционными технологиями возведения кирпичных стен позволило снизить на 25% стоимость, в 1,5 раза повысить сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, а также повысить радиационно-защитные свойства ограждающих конструкций.

### Выводы

1. Предварительная механохимическая активация цемента и промышленных отходов в жидкой среде позволяет получить высокооднородные и высокодисперсные смеси для теплоизоляционных бетонов непосредственно на строительной площадке.

2. Разработанная интенсивная ресурсосберегающая технология устройства ограждающих конструкций позволяет не только утилизировать тонкодисперсные промышленные отходы, но и значительно повысить теплозащитные функции стен зданий.

3. Особый эффект достигается при строительстве жилых домов, в которых основные виды нагрузок воспринимает каркас, выполненный из различных видов материалов (деревянные брусья, кирпичные стены и столбы, сборные железобетонные ригели и колонны небольшого сечения и т.п.), а ограждающие конструкции стен выполнены с использованием бетонов низкой плотности. При таком конструктивном решении ограждающие конструкции имеют толщину 30-40 см и удовлетворяют современным требованиям по теплозащите зданий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плотников, В.В. Современные конструкционные, теплоизоляционные и отделочные материалы для стен энергоэффективных зданий [Текст] / В.В.Плотников. – Брянск: БГИТА, 2013. - 168 с.
2. Плотников, В.В. Современные технологии теплозащиты зданий [Текст] / В.В.Плотников, М.В. Ботаговский. - Брянск: БГИТА, 2013. – 164 с.
3. Плотников, В.В. Повышение долговечности монолитного бетона низкой плотности путем модификации цемента активированными кристаллогидратами [Текст] / В.В. Плотников, М.В. Ботаговский // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. - №10. - С.33-39.

#### **В.В. Плотников**

ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет, г.Брянск  
Проректор по научно-инновационной деятельности, доктор технических наук, профессор,  
зав.кафедрой «Строительное производство»  
E-mail: [plotn57@mail.ru](mailto:plotn57@mail.ru)

#### **М.В. Ботаговский**

ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия», г.Брянск  
Старший преподаватель  
E-mail: [bo1981@mail.ru](mailto:bo1981@mail.ru)

#### **С.В. Плотникова**

ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия», г.Брянск  
Аспирант  
E-mail: [wonderlandru@gmail.com](mailto:wonderlandru@gmail.com)

---

V. PLOTNIKOV, M. BOTAGOVSKIY, S. PLOTNIKOVA

## **BUILDING ENVELOPE WITH THE USE OF LOW DENSITY MONOLITHIC CONCRETE BASED ON INDUSTRIAL WASTE**

*The article presents the results of research on the design of energy-and resource-saving technology of construction multilayer exterior walls in monolithic housing construction using the multicomponent cement foam concretes with low density and thermal conductivity. Technology provides for the preparative foam concrete whose main components are cement, and finely dispersed industrial waste, previously activated in a liquid medium directly at the construction site. It is shown that the obtained monolithic foam concrete has high operational performance and can be recommended for use in the energy-efficient building envelope.*

**Keywords:** multi-layered enclosing constructions, thermal protection of buildings, monolithic foam concrete, thermal conductivity, mechanochemical activation, activation in a liquid medium, finely dispersed industrial waste.

## BIBLIOGRAPHY

1. Plotnikov, V.V. Modern constructional, thermal insulation and finishing materials for energy efficient buildings walls [Tekst] / V.V. Plotnikov. - Bryansk: BGITA, 2013. – 168 p (In Russian).
2. Plotnikov, V.V. Sovremennye tekhnologii povysheniya teplozashchity zdaniy [Modern technologies of increasing thermal performance of buildings.] / V.V. Plotnikov, M.V. Botagovskiy. - Bryansk: BGITA Publ., - 2010. - 199 p. (In Russian).
3. Plotnikov, V.V. Botagovskiy M.V. Increasing the durability of monolithic foam concrete of low density by cement modification with activated crystalline hydrates / V.V. Plotnikov, M.V. Botagovskiy // Promышленное и гражданское строительство [Industrial and Civil Engineering]. – 2015. - № 10. - P.33-39 (In Russian).

**V. Plotnikov**

Bryansk State Engineering Technological University, Bryansk  
Vice-rector for scientific and innovation activity Doctor of Engineering, professor,  
head of the "Building manufacturing" department  
E-mail: [plotn57@mail.ru](mailto:plotn57@mail.ru)

**M. Botagovskiy**

Bryansk State Engineering Technological University, Bryansk  
Senior Lecturer  
E-mail: [bo1981@mail.ru](mailto:bo1981@mail.ru)

**S. Plotnikova**

Bryansk State Engineering Technological University, Bryansk  
Postgraduate student  
E-mail: [wonderlandru@gmail.com](mailto:wonderlandru@gmail.com)

ТЮТЮНОВ Д.Н., ФЕДОРОВ С.С., КЛЮЕВА Н.В.

## ОДИН ИЗ ВАРИАНТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

В предлагаемой статье рассматривается новая методика определения оценки и диагностики временных параметров системы теплоснабжения зданий и сооружений. Приводится алгоритм расчета интервала времени перезапуска системы автоматического управления процессом теплоснабжения различных объектов при зависимом подключении к тепловым сетям. По результатам проведенного анализа получены границы исследуемых интервалов времени. Представлено графическое сопровождение выведенных формул. Разработана функциональная схема определения интервалов тестирования системы автоматического управления тепловыми потоками с учетом времени чистого запаздывания набора температур в тепловой нагрузке.

**Ключевые слова:** система управление, алгоритм, математическая модель, ресурсосбережение, функциональная схема.

Реализация Государственных программ РФ в области энергосбережения и повышение энергетической эффективности требует разработки и внедрения методов оптимального управления тепловыми потоками в системе теплоснабжения зданий и сооружений. Наибольший интерес вызывают системы управления (СУ) процессом теплофикации объектов, подключенных по зависимой схеме к наружным тепловым сетям, как наиболее распространенные. Разработка таких систем невозможна без математических моделей оптимизации функционирования объектов исследования.

В работах [1, 2] был проведен расчет теплового баланса зависимой системы теплоснабжения, рис.1.

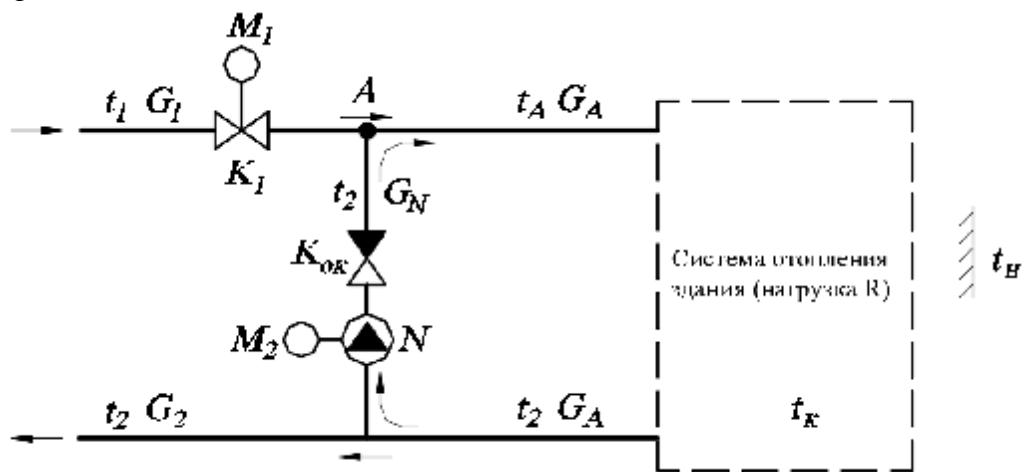


Рисунок 1 – Принципиальная схема системы теплоснабжения при зависимом подключении к источнику тепла

Была получена формула, характеризующая температурный режим в точке смешения A:

$$t_A = t_k \frac{\alpha}{\epsilon} - \exp \frac{\alpha}{\epsilon} \frac{t_3 - t}{T} \frac{\alpha}{\epsilon} + t_1 \exp \frac{\alpha}{\epsilon} \frac{t_3 - t}{T} \frac{\alpha}{\epsilon}, \quad (1)$$

где  $t_1, t_A, t_k$  – соответственно температуры: теплоносителя в подающем трубопроводе, точке смешения теплоносителя, воздуха в отапливаемом помещении,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  – время, с;  $t_3, T$  – соот-

ветственно время полного запаздывания в переходном процессе и постоянная тепловой нагрузки  $R, \text{с.}$

На (рис. 1) так же показаны:  $t_2, t_h$  - соответственно температуры теплоносителя в отводящем трубопроводе и наружного воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $G_1, G_2, G_A, G_N$  - соответственно расходы теплоносителя в подающем, отводящем трубопроводах, в точке смешения  $A$ , регулирующем механизме  $N, \text{м}^3/\text{ч}$ .

В работе [3] был разработан алгоритм управления выше указанной системой, включающий в себя четыре этапа. На первом этапе происходит мониторинг состояния наружных температур на каждом контуре. На втором этапе рассчитывается изменение расхода теплоносителя на  $i$ -м контуре и суммарное общее изменение расхода теплоносителя, проходящего через главный исполнительный механизм. На третьем этапе формируется и выдается управляющее воздействие на главный исполнительный механизм. На четвертом этапе формируется и выдается управляющее воздействие на  $i$ -й исполнительный механизм. В общем виде блок-схема выше указанного алгоритма представлена на (рис. 2).

Применение представленного выше алгоритма управления распределением тепловых потоков, улучшает энергетические показатели системы теплоснабжения, что в свою очередь положительно отражается на сроке службы зданий и сооружений [4-5].

Очевидно, справедливо неравенство:

$$t_A > t_2. \quad (2)$$

Учитывая (1), получим:

$$t_A = t_k \frac{e^{\frac{t_3 - t}{T}}}{e^{\frac{t_3 - t}{T}}} + t_1 \exp \frac{e^{\frac{t_3 - t}{T}}}{e^{\frac{t_3 - t}{T}}} > t_2. \quad (3)$$

Преобразуем (3) к виду удобному для логарифмирования:

$$\frac{t_1 - t_k}{t_2 - t_k} > \exp \frac{e^{\frac{t_3 - t}{T}}}{e^{\frac{t_3 - t}{T}}}. \quad (4)$$

Т.к.  $t_1 > t_2 > t_k$ , то  $\frac{t_1 - t_k}{t_2 - t_k} > 1$ . С другой стороны для

основания натурального логарифма  $e \approx 2,718 > 1$  справедливо неравенство  $\exp \frac{e^{\frac{t_3 - t}{T}}}{e^{\frac{t_3 - t}{T}}} > 1$ . Учитывая эти рассуждения, мы имеем право прологарифмировать обе части неравенства (4), сохранив его знак:

$$\ln \frac{t_1 - t_k}{t_2 - t_k} > \frac{t - t_3}{T}. \quad (5)$$

Отсюда следует:

$$t < t_3 + T \ln \frac{t_1 - t_k}{t_2 - t_k}. \quad (6)$$

Из очевидного неравенства:

$$\frac{t - t_3}{T} \geq 0, \quad (7)$$

имеем:

$$t \geq t_3. \quad (8)$$

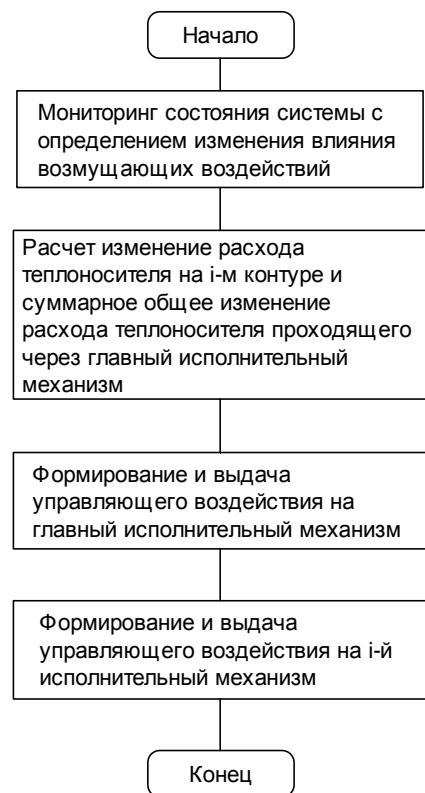


Рисунок 2 – Общий вид блок-схемы алгоритма управления системой теплоснабжения

Утверждение (8) следует из того, что возрастание температуры в тепловой нагрузке  $R$  наступает с момента поступления нагретого теплоносителя при  $t = t_3$  в точку А [6].

Учитывая (6) и (8), получим:

$$t_3 \leq t_3 + T \ln \frac{t_1 - t_k}{t_2 - t_k}. \quad (9)$$

Неравенство (9) позволяет определить период времени  $t_d$  запуска алгоритма управления системой теплоснабжения при зависимом подключении к источнику тепла.

В качестве  $t_d$  можно выбрать величину:

$$t_d = g \times t_3 + T \ln \frac{t_1 - t_k}{t_2 - t_k}, \quad (10)$$

где  $g \in (0;1)$  - константа, которую можно задавать заранее.

Подставляя (10) в (1) и учитывая дискретность  $t_d$ , получим:

$$t_A(t_d) = t_k + (t_1 - t_k) \exp \frac{g \times t_3}{T} + T \ln \frac{t_1 - t_k}{t_2 - t_k} > t_2. \quad (11)$$

Преобразовав это неравенство получим:

$$\exp \frac{g \times t_3}{T} > (t_1 - t_k)^{g+1} > (t_2 - t_k)^{g+1}. \quad (12)$$

График функции  $t_A(t_d)$  температуры теплоносителя в точке А от времени запуска работы алгоритма представлен на рисунке 3.

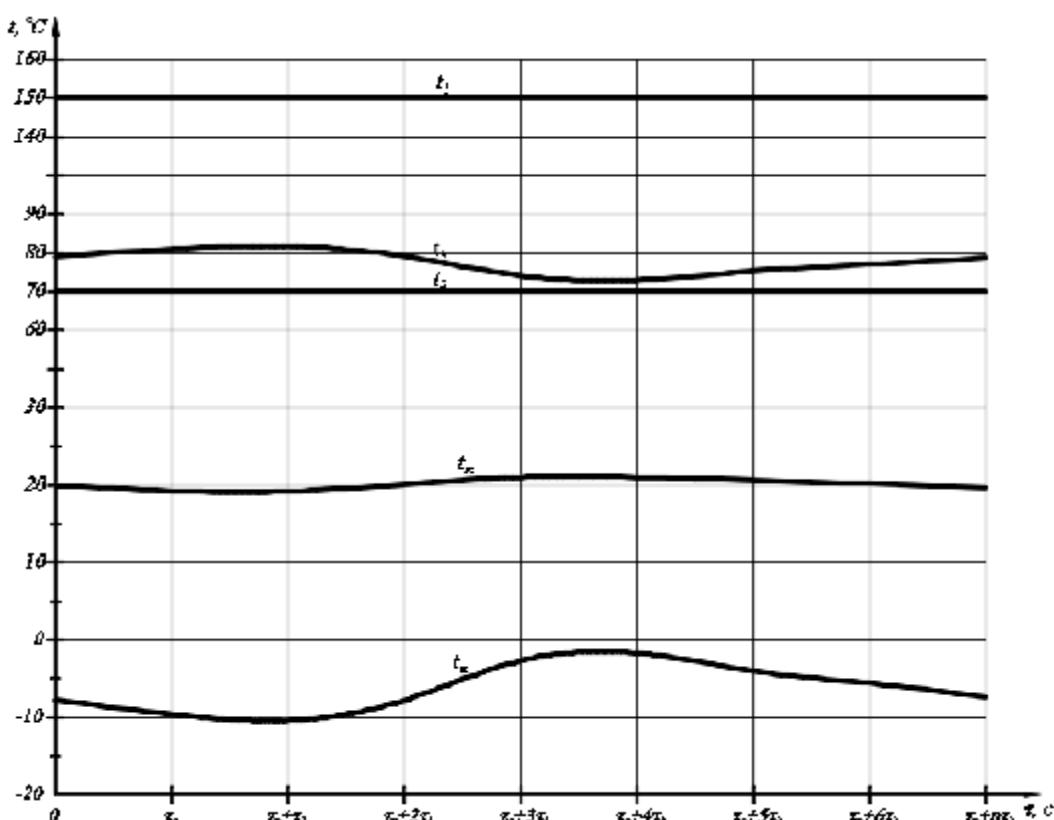


Рисунок 3 – Зависимость температур  $t_A$ ,  $t_k$  от температуры наружного воздуха  $t_H$  и времени  $t_d$

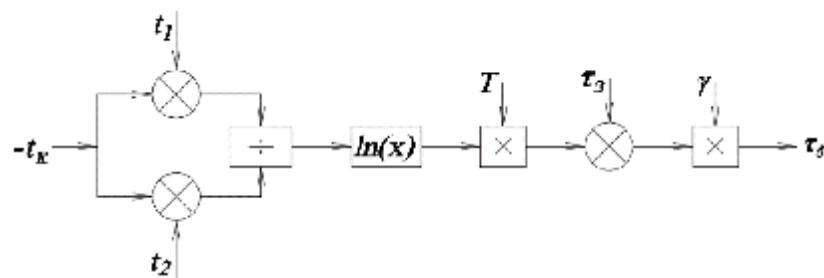


Рисунок 4 – Структурная схема определения времени  $\tau_\delta$  перезапуска алгоритма управления системой теплоснабжения при зависимом присоединении к источнику тепла

Используя соотношение (10), и опыт проведенных исследований [7-8] определение интервала времени  $\tau_\delta$  для перезапуска алгоритма управления при зависимом присоединении к источнику тепла, представим в виде структурной схемы на (рис. 4).

**Выводы:**

- Проведен анализ временных интервалов запуска алгоритма управления системой теплоснабжения при зависимом подключении к тепловым сетям.
- Представлен общий вид блок-схемы алгоритма управления системой теплоснабжения.
- Выведена формула определения периода времени  $\tau_\delta$  в зависимости от температуры подающего теплоносителя  $t_1$ .
- Разработана структурная схема для определения  $\tau_\delta$ .

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Федоров, С.С. Система управления процессом теплоснабжения промышленных предприятий при зависимом присоединении к тепловым сетям [Текст] / С.С. Федоров // Строительство и реконструкция. –2014. – № 5 (55). – С. 106-110.
- Федоров, С.С. Оптимизация процесса управления системой теплоснабжения зданий [Текст] / С.С. Федоров, Н.В. Клюева, Н.В. Бакаева // Строительство и реконструкция. – 2015. – № 5 (61). – С. 90-95.
- Константинов, И.С. Алгоритм управления системой многоконтурного теплоснабжения зданий и сооружений [Текст] / И.С. Константинов, С.С. Федоров // Строительство и реконструкция. – 2015. № 6 (62). С. 107-111.
- Бондаренко, В.М. Некоторые результаты анализа и обобщения научных исследований по теории конструктивной безопасности и живучести [Текст] / В.М. Бондаренко, Н.В. Клюева, В.И. Колчунов, Н.Б. Андросова // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 4. – С. 3-16.
- Андросова, Н.Б. Некоторые предложения к нормированию параметров живучести сооружений [Текст] / Н.Б. Андросова, Н.В. Клюева, В.И. Колчунов // Вестник центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2011. – № 15. – С. 17.
- Федоров, С.С. К вопросу моделирования процесса управления системой теплоснабжения ресурсоэффективных зданий [Текст] / С.С. Федоров, Д.Н. Тютюнов, Н.В. Клюева, Л.И. Студеникина // Строительство и реконструкция. – 2014. – № 1 (51). – С. 92-95.
- Ivashchuk O.A. Human resources potential as an object of automated control [Text] / O.A. Ivashchuk, I.S. Konstantinov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – T. 10. – № 12. –P. 31371-31380.
- Ivashchuk O.A. Smart control system of human resources potential of the region [Text] / O.A. Ivashchuk, I.S. Konstantinov, I.V. Udovenko // Smart Innovation, Systems and Technologies. –2015. –T. 41. – P. 481-490.

**Д.Н. Тютюнов**

Юго-Западный государственный университет, г. Курск  
Кандидат технических наук, доцент, кафедра высшей математики  
E-mail: [tjutjunov@mail.ru](mailto:tjutjunov@mail.ru).

**С.С. Федоров**

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Преподаватель, кафедра теплогазоводоснабжение

E-mail: [ssfedorov@list.ru](mailto:ssfedorov@list.ru).

**Н.В. Клюева**

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства

E-mail: [klynavit@yandex.ru](mailto:klynavit@yandex.ru).

---

D. TYUTYUNOV, S. FEDOROV, N. KLYUEVA

**ONE OF OPTIONS OF DEFINITION OF TIME OF DECISION-MAKING IN THE CONTROL SYSTEM OF HEAT SUPPLY OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS**

*In the offered article the new technique of definition of an assessment and diagnostics of temporary parameters of system of heat supply of buildings and constructions is considered. The algorithm of calculation of a time slice of restarting of system of automatic control of process of heat supply of various objects at dependent connection to thermal networks is given. By results of the carried-out analysis borders of the studied time slices are received. Graphic maintenance of the removed formulas is presented. The function chart of definition of intervals of testing of system of automatic control of heat fluxes taking into account time of a dead time of a set of temperatures in thermal loading is developed.*

**Keywords:** system management, algorithm, mathematical model, resource-saving, the function chart.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Fedorov, S.S. Sistema upravleniya protsessom teplosnabzheniya promyshlenniyh predpriyatiy pri za-visimom prisoyedinenii k teplovym setyam [Tekst] / S.S. Fedorov // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. –2014. – № 5 (55). – S. 106-110.
2. Fedorov, S.S. Optimizatsiya protsessa upravleniya sistemoy teplosnabzheniya zdaniy [Tekst] / S.S. Fedorov, N.V. Klyuyeva, N.V. Bakayeva // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2015. – № 5 (61). – S. 90-95.
3. Konstantinov, I.S. Algoritm upravleniya sistemoy mnogokonturnogo teplosnabzheniya zdaniy i so-oruzheniy [Tekst] / I.S. Konstantinov, S.S. Fedorov // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2015. № 6 (62). S. 107-111.
4. Bondarenko, V.M. Nekotoryye rezul'taty analiza i obobshcheniya nauchnykh issledovaniy po teorii konstruktivnoy bezopasnosti i zhivuchesti [Tekst] / V.M. Bondarenko, N.V. Klyuyeva, V.I. Kolchunov, N.B. Androsova // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2012. – № 4. – S. 3-16.
5. Androsova, N.B. Nekotoryye predlozheniya k normirovaniyu parametrov zhivuchesti sooruzheniy [Tekst] / N.B. Androsova, N.V. Klyuyeva, V.I. Kolchunov // Vestnik tsentral'nogo regional'nogo otdeleniya Rossijskoy akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk. – 2011. – № 15. – S. 17.
6. Fedorov, S.S. K voprosu modelirovaniya protsessa upravleniya sistemoy teplosnabzheniya resursoeffektivnykh zdaniy [Tekst] / S.S. Fedorov, D.N. Tyutynov, N.V. Klyuyeva, L.I. Studenikina // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2014. – № 1 (51). – S. 92-95.
7. Ivashchuk O.A. Human resources potential as an object of automated control [Text] / O.A. Ivashchuk, I.S. Konstantinov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – T. 10. – № 12. – P. 31371-31380.
8. Ivashchuk O.A. Smart control system of human resources potential of the region [Text] / O.A. Ivashchuk, I.S. Konstantinov, I.V. Udovenko // Smart Innovation, Systems and Technologies. –2015. –T. 41. – P. 481-490.

**D. Tyutynov**

South Western state university, Kursk

Candidate of technical sciences, associated professor of high mathematic department

E-mail: [tjutunov@mail.ru](mailto:tjutunov@mail.ru).

**S. Fedorov**

South Western state university, Kursk

Lecturer of the department of heat and gas supply

E-mail: [ssfedorov@list.ru](mailto:ssfedorov@list.ru).

**N. Klyueva**

South Western state university, Kursk

Doctor of technical sciences, professor, head of the civil engineering department

E-mail: [klynavit@yandex.ru](mailto:klynavit@yandex.ru)

ХРИСТОФОРОВ А.И., ХРИСТОФОРОВА И.А., ЯДЫКИНА Е.М.

## РАЗРАБОТКА ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПЕНОПОЛИВИНИЛХЛОРИДА

*Рассмотрена технология получения импортозамещающего материала на основе поливинилхлорида. Вспененные материалы производят по прессовой, беспрессовой, заливочной и другим технологиям. В России производят пенополивинилхлорид только по прессовой технологии, что в настоящее время не позволяет получать конкурентоспособный материал плотностью на уровне 40-60 кг/м<sup>3</sup>. Представленные в статье результаты исследований с использованием активного эксперимента позволили разработать композицию и технологические режимы переработки для получения пенополивинилхлорида с плотностью на уровне 50 кг/м<sup>3</sup>.*

**Ключевые слова:** теплоизоляционные материалы, строительство, импортозамещение, поливинилхлорид

Для государственной промышленной политики России, в связи со сложившимися экономическими отношениями с Евросоюзом, крайне актуально решение вопросов импортозамещения, особенно в сфере, затрагивающей вопросы обороноспособности государства.

Исходя из вышесказанного целью выполнения исследований явилась разработка импортозамещающего материала на основе пенополивинилхлорида, который необходим для применения в строительстве жилых помещений, судостроении и специальной технике [1, 2, 9].

В настоящее время для тепло- звукоизоляции судов используется материал стран Евросоюза фирм Airex: марок R 63.80, C 70.75, C 70.200, C 71.75 и Divinycell: марок H 60, HP 80, R 63.50, на основе пенополивинилхлорида (ПВХ), получаемого по заливочной технологии. Производитель: компания DIAB (Швеция). Сэндвичевые конструкции (структуры) - класс композиционных материалов, состоящий из следующих элементов: две тонких прочных облицовочных пластины - обшивки, толстая легкая сердцевина - заполнитель ПВХ- пенопласт (типа Divinycell), разделяющая несущие пластины и распределяющая нагрузку между ними адгезионные слои, связывающие пластины с заполнителем ПВХ-пенопластом и передающие нагрузку от заполнителя к облицовкам и обратно. Вся линейка ПВХ пенопласта Divinycell H имеет высокое отношение прочность/вес, исключительную динамическую прочность, превосходные изолирующие свойства. ПВХ пенопласт имеет структуру с закрытыми ячейками, что делает его водонепроницаемым. Свойства DIVINYCELL низкая стойкость к биологическому воздействию как следствие ограниченность к применению в судостроении. Эти свойства обеспечили конкурентное преимущество ПВХ- пенопласта перед другими материалами, используемыми в производстве сэндвич-конструкций и обусловили широкое применение ПВХ пенопласта Divinycell в первую очередь в строительной индустрии, судостроении, автомобилестроении, энергомашиностроении (ветряные генераторы), авиастроении и позволяют применять ПВХ-пенопласт Divinycell в сэндвич-конструкциях, где необходима прочность, жесткость и низкий вес. ПВХ-пенопласт фирмы DIAB доступен в различном диапазоне плотности, как в стандартных листах, так и по требованиям клиента.

Для укладки на криволинейные поверхности предназначены листы ПВХ пенопласта с нарезанными ячейками и толщиной от 5 до 25 мм. Для обеспечения целостности листа с одной стороны проклеена стеклосетка. Каналы получены ножом (ширина ножа 1,25 мм). Для ПВХ-

пенопласта толщиной до 15 мм, каналы получены пилой (ширина полотна 1,25). Для ПВХ-пенопласта от 15 мм, каналы получены как ножом, так и пилой. ПВХ пенопласт Divinycell HCP с его высоким гидравлическим пределом разрушения используется для различных подводных конструкций. ПВХ-пенопласт Divinycell HT имеет состав, который подходит для различных систем предварительной пропитки и температур проведения процесса. Теплоизоляционный материал Divinycell HD обладает превосходными динамическими характеристиками и высокой упругостью. Предназначен для использования в фундаментах морских сооружений, на которые воздействует слеминг и ударные нагрузки. Изоляционные ПВХ-пенопласт Divinycell IPN демонстрируют низкую проницаемость паров воды при предельно низких и высоких температурах. ПВХ пенопласт Divinycell HPS был особо разработан для использования совместно с эпоксидной предварительной пропиткой. Подходит для проведения процессов при высоких температурах, вплоть до 120 °C.

Все марки ПВХ -пенопласта Divinycell - самозатухающие, при кислородном индексе от 25 до 40. Тепловыделение (ТВ) - это мера энергии, выделяющейся из материала при горении. Скорость тепловыделения (СВВ) - это скорость, с которой энергия выделяется во время испытаний; особенно интересна Пиковая скорость. Типовое значение ТВ и СТВ для ПВХ-пенопласта Divinycell. Токсичность = 4000, СО = 150, HCl = 300, HCN = 15. Никаких следов HF, HBr, NO, SO, NH или HCHO не обнаруживается. Воспламеняемость включает в себя понятия экспериментальных длины горения и времени горения и классифицируется от S1 до S5, причем S5 - самый высокий класс. Имеется два класса по развитию дыма и созданию капель, SR1/SR2 и ST1/ST2, где SR2 и ST2 - самые высокие. ПВХ-пенопласт Divinycell классифицирован как S3/S4 и ST2 [10].

В настоящее время в России имеется предприятие, которое производит по прессовой технологии пенополивинилхлорид с размерами плит 500×500 мм<sup>2</sup> и толщиной до 50 мм, с минимальной плотностью 115 кг/м<sup>3</sup>. В связи с введением эмбарго Евросоюзом на поставку материалов в Россию, возникла острая необходимость в импортозамещении с разработкой композиций для производства пенополивинилхлорида плотностью не более 60 кг/м<sup>3</sup> по прессовой технологии с требуемыми свойствами. Разработанные технологии производства сэндвич-пенелей позволяют получать панели заданных геометрических размеров и конфигурации из отдельных фрагментов пенополивинилхлорида, полученного по прессовой технологии [3-8, 11].

Это определяет актуальность настоящего исследования.

Полимерные материалы на основе поливинилхлорида составляют 30% всего мирового производства пластических масс (кроме России). Широкое распространение этих материалов обусловлено их хорошими физико-химическими характеристиками, химической стойкостью, прекрасной способностью к модификации различными полимерами и добавками, а также возможностью получения из них изделий практически всем известными способами переработки. Для обеспечения импортозамещения разрабатываемый материал должен обеспечивать свойства мирового уровня.

Сырьем для производства пенопласта служит поливинилхлорид эмульсионных марок. В состав композиции входят также мономеры (чаще всего метилметакрилат (ММА)) для увеличения эластичности при повышенных температурах, газообразователи (азоизобутиронитрил – порофор ЧХЗ-57, карбонат аммония, гидрокарбонат натрия и др.), активаторы, которые снижают температуру разложения газообразователей, стабилизаторы структуры, наполнители. Пены получают прессовым методом.

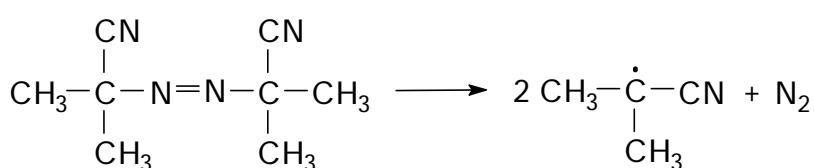
На ПКФ «Инкомпен» пено-ПВХ (ТУ 2244-416-05761784-97) выпускают в виде листов размером 620×620×45 мм с плотностью 115 – 250 кг/м<sup>3</sup>. Для данного предприятия проводи-

лась модификация жесткого пенопласта с целью улучшения его свойств и усовершенствования технологии изготовления. Недостатком производственной композиции являлось продолжительное время вспенивания – до 90 мин. Поэтому была поставлена задача сократить время вспенивания заготовки в паровой камере при сохранении прочности при сжатии получаемого жесткого ППВХ.

Для постановки эксперимента использовались следующие ингредиенты: ПВХ марки ЕП6250Ж, метилметакрилат (ММА), карбонат аммония (УГАС), гидрокарбонат натрия, азоизобутиронитрил (ЧХЗ-57), пластификатор (ПЛФ). Вспенивающуюся полимерную композицию перерабатывали в пенопласт по известной прессовой технологии. Компоненты загружали в шаровую мельницу, перемешивали, просеивали, таблетировали, спекали заготовку при температуре 170 – 180 °С при удельном давлении прессования 12 – 13 МПа. Охлажденную заготовку помещали в паровую камеру вспенивания и при температуре 98 – 100 °С вспенивали до заданной плотности. Сущность процесса снижения времени вспенивания заготовки при введении малых количеств пластификатора заключается в резком снижении вязкости полимерной композиции при температуре 98 – 100 °С при введении 6 и более мас.ч. ПЛФ на 100 мас.ч. ПВХ. При этом пластификатор из состояния растворителя, способствующему набуханию поливинилхлорида, переходит в состояние истинного растворителя ПВХ.

Газовые числа газообразователей, применяемых в работе составляют 102 – 115 см<sup>3</sup>/г.

Разложение газообразователей при повышении температуры протекает по следующей схеме:



Был проведен активный эксперимент с применением плана Бокса-Бенкина. Определялись два выхода системы теплоизоляционного материала: плотность и прочность при 10%-ном сжатии.

Были стабилизированы концентрации следующих ингредиентов композиции: ПВХ; ММА; ЧХЗ-57; гидрокарбонат натрия NaHCO<sub>3</sub>. Не изменялись и технологические параметры изготовления ППВХ: удельное давление прессования, температура, время термообработки и вспенивания.

В ходе математических расчетов в среде MS Excel получена следующая система уравнений регрессии:

$$\begin{aligned} Y_1 (\rho, \text{кг}/\text{м}^3) &= 80,6 + 5,625x_1 + 4,375x_2 - 7,25x_3 + 7,325x_1^2 + 19,25x_1x_2 - 11,5x_1x_3; \\ Y_2 (s_{10}, \text{МПа}) &= 1,5 - 0,3875x_3 + 0,6x_1x_2 - 0,275x_1x_3. \end{aligned} \quad (1)$$

По уравнениям 1 построены поверхности отклика, которые представлены на рис. 1.

В ходе проведения математического планирования был получен ПВХ-пенопласт с малой плотностью, равной 51 кг/м<sup>3</sup>.

Области применения данного вида материала: судостроение, автомобильестроение, энергомашиностроение, авиастроение, техника специального назначения, строительные материалы и конструкции.

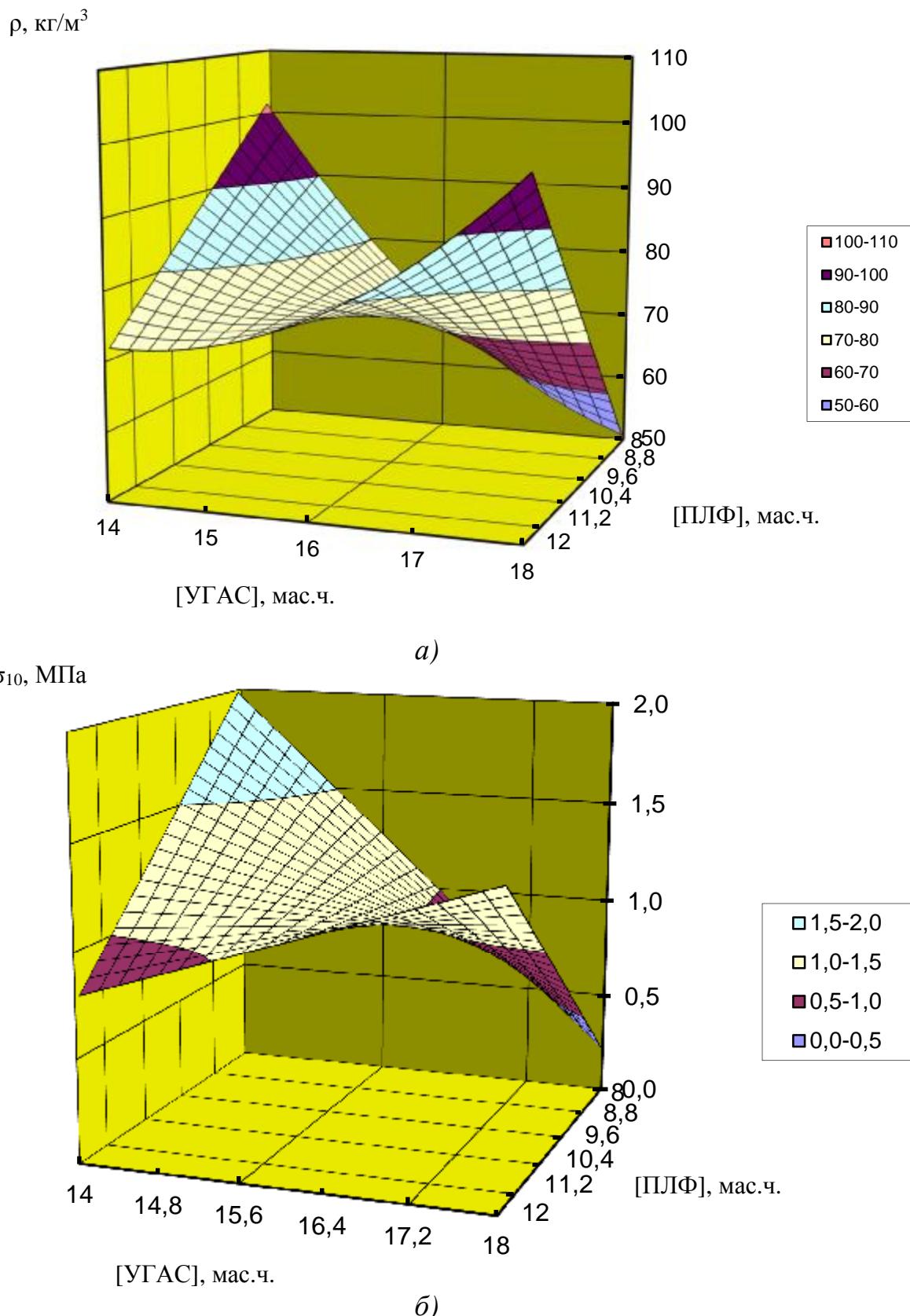


Рисунок 1 - Влияние содержания пластификатора (ПЛФ) и карбоната аммония (УГАС) на свойства пенопласта: а) плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ; б) прочность при 10 %-ном сжатии, МПа

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-3-79. Строительная теплотехника. М.: Госстрой СССР, 1995. – 37 с.
2. Раскина, Э.М. Строительная полимерная теплоизоляция [Текст] // Полимер. матер. изделия, оборуд., технол. – 2000. – № 10. – С. 1-5.
3. Христофоров, А.И. Разработка технологии теплоизоляционного строительного материала на основе жесткого пенополивинилхлорида [Текст] / А.И. Христофоров, И.А. Христофорова, Е.А. Сорокина, О.Ф. Проскурина // Материалы 3-ей Международной НТК "Производственные технологии": Владимир, ВлГУ, май 2000 г. – Владимир: ВлГУ. – 2000. – С. 106.
4. Молькова, Е.Е. Исследование композиций, содержащих азодикарбонамид и диоктилфталат, для получения жесткого пенополивинилхлорида [Текст] / Е.Е. Молькова, А.И. Христофоров, И.А. Христофорова // X Международная конференция "Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений" и Вторые Кирпичниковские чтения. Тез. докл.: Казань: КГТУ, 22-24 мая 2001 г. – Казань: КГТУ. – 2001.
5. Молькова, Е.Е. Применение планирования эксперимента при производстве теплоизоляционного материала [Текст] / Е.Е. Молькова, А.И. Христофоров, И.А. Христофорова // 15 МНК "Математические методы в технике и технологиях. ММТТ-15": Сб. трудов: Тамбов, ТГТУ. – 5 – 7 июня 2002 г. – Тамбов: ТГТУ. – 2002. – Том 6. – С. 153.
6. Патент РФ 2177965 МКИ С 08 L 27/06, С 08 J9/10, С 08 K 13/02 // (3:26, 5:101, 5:12, 5:23) Вспенивающая полимерная композиция / Христофоров А.И., Христофорова И.А., Пыленкова Е.Б.(РФ), бюл.№ 1 от 10.01.2002. – 12 с.
7. Христофорова, И.А. Влияние минеральных газообразователей на плотность жесткого пенопласта [Текст] / И.А. Христофорова, Е.Е. Молькова, А.И. Христофоров // 2 Всероссийская научная конференция (с международным участием) "Физико-химия процессов переработки полимеров": Тез. докл.. Иваново: ИГХТУ, 14-16 октября 2002 г. – Иваново: ИГХТУ. – 2002. – С. 124 – 125.
8. Христофоров, А.И. Исследование процесса газовыделения при получении пенопласта на основе поливинилхлорида [Текст] / А.И. Христофоров, И.А. Христофорова, Е.Е. Молькова // Известия ВУЗов "Химия и хим. технология". – 2004. – Том 47. – Вып.1. – С. 53 – 56.
9. Бакирова, И.Н. Газонаполненные полимеры: Учебное пособие [Текст] / И.Н. Бакирова, Л.А. Зенитова. - Казань: изд-во КГТУ, 2009. – 105 с.
10. Diab groupe: сайт Diab groupe [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.diabgroup.com>
11. Христофорова, И.А. Модификация теплоизоляционного материала из поливинилхлорида [Текст] / И.А. Христофорова // Строительные материалы. – 2005 г. – № 5. – С. 56 – 57.

### **А.И. Христофоров**

ФГБОУ ВПО "Владимирский государственный  
университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых", г. Владимир  
Доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры "Химические технологии"  
E-mail: [khristoforov@mail.ru](mailto:khristoforov@mail.ru)

### **И.А. Христофорова**

ФГБОУ ВПО "Владимирский государственный  
университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых", г. Владимир  
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры  
"Химические технологии"  
E-mail: [khristoforova-i@mail.ru](mailto:khristoforova-i@mail.ru)

### **Е.М. Ядыкина**

ФГБОУ ВПО "Владимирский государственный  
университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых", г. Владимир  
Магистрант кафедры «Химические технологии»  
E-mail: [lenok\\_3012@bk.ru](mailto:lenok_3012@bk.ru)

---

A. KHRISTOFOROV, I. KHRISTOFOROVA, E. YADYKINA

## DEVELOPMENT OF THE IMPORT SUBSTITUTED MATERIAL BASED ON POLYVINYLCHLORIDE FOAMS

*The technology of production of import-substituted material in terms of polyvinyl chloride is reviewed. The foam materials manufacture by pressing, without pressing and other technology. In Russia polyvinyl chloride manufacture by only pressing, that not make it possible to get a competitive material with density about 40-60 kg/m<sup>3</sup> at the present day. Research results represented in article and active experiment were made it possible to developed composition and technological conditions of processing for production of polyvinyl chloride with density about 50 kg/m<sup>3</sup>.*

**Keywords:** insulation material, development, import substitution, polyvinylchloride.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. SNiP II-3-79. Stroitel'naya teplotekhnika. M.: Gosstroy SSSR, 1995. – 37 s.
2. Raskina, E.M. Stroitel'naya polimernaya teploizolyatsiya [Tekst] // Polimer. mater. izdeliya, oborud., tekhnol. – 2000. – № 10. – S. 1-5.
3. Khristoforov, A.I. Razrabotka tekhnologii teploizolyatsionnogo stroitel'nogo materiala na osnove zhestkogo penopolivinilkhlorida [Tekst] / A.I. Khristoforov, I.A. Khristoforova, Ye.A. Sorokina, O.F. Proskurina // Materialy 3-ye Mezhdunarodnoy NTK "Proizvodstvennyye tekhnologii": Vladimir, VlGU, may 2000 g. – Vladimir: VlGU. – 2000. – S. 106.
4. Mol'kova, Ye.Ye. Issledovaniye kompozitsiy, soderzhashchikh azodikarbonamid i dioktilftalat, dlya polucheniya zhestkogo penopolivinilkhlorida [Tekst] / Ye.Ye. Mol'kova, A.I. Khristoforov, I.A. Khristoforova // X Mezhdunarodnaya konferentsiya "Sintez, issledovaniye svoystv, modifikatsiya i pererabotka vysokomolekulyarnykh soyedineniy" i Vtoryye Kirpichnikovskiye chteniya. Tez. dokl.: Kazan': KGTU, 22-24 maya 2001 g. – Kazan': KGTU. – 2001.
5. Mol'kova, Ye.Ye. Primeniye planirovaniya eksperimenta pri proizvodstve teploizolyatsionnogo materiala [Tekst] / Ye.Ye. Mol'kova, A.I. Khristoforov, I.A. Khristoforova // 15 MNK "Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh. MMTT-15": Sb. trudov: Tambov, TGTU. – 5 – 7 iyunya 2002 g. – Tambov: TGTU. – 2002. – Tom 6. – S. 153.
6. Patent RF 2177965 MKI S 08 L 27/06, S 08 J9/10, S 08 K 13/02 // (3:26, 5:101, 5:12, 5:23) Vspenivayushchaya polimernaya kompozitsiya / Khristoforov A.I., Khristoforova I.A., Pylenkova Ye.B.(RF), byul.№ 1 ot 10.01.2002.– 12 s.
7. Khristoforova, I.A. Vliyaniye mineral'nykh gazoobrazovateley na plotnost' zhestkogo penoplasta [Tekst] / I.A. Khristoforova, Ye.Ye. Mol'kova, A.I. Khristoforov // 2 Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya (s mezh-dunarodnym uchastiyem) "Fiziko-khimiya protsessov pererabotki polimerov": Tez. dokl.. Ivanovo: IGKHTU, 14-16 oktyabrya 2002 g. – Ivanovo: IGKHTU. – 2002. – S. 124 – 125.
8. Khristoforov, A.I. Issledovaniye protsessa gazovydeleniya pri poluchenii penoplasta na osnove polivinilkhlorida [Tekst] / A.I. Khristoforov, I.A. Khristoforova, Ye.Ye. Mol'kova // Izvestiya VUZov "Khimiya i khim. tekhnologiya". – 2004. – Tom 47. – Vyp.1. – S. 53 – 56.
9. Bakirova, I.N. Gazonapolnennyye polimery: Uchebnoye posobiye [Tekst] / I.N. Bakirova, L.A. Zenito-va. - Kazan': izd-vo KGTU, 2009. – 105 s.
10. Diab groupe: sayt Diab groupe [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.diabgroup.com>
11. Khristoforova, I.A. Modifikatsiya teploizolyatsionnogo materiala iz polivinilkhlorida [Tekst] / I.A. Khristoforova // Stroitel'nyye materialy. – 2005 g. – № 5. – S. 56 – 57.

### **A. Khristoforov**

«Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs», Vladimir,  
Doctor of Engineering Sciences, professor of Department of  
"Chemical Technology"  
E-mail: [khristoforov@mail.ru](mailto:khristoforov@mail.ru)

### **I. Khristoforova**

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir,  
Doctor of Engineering Sciences, professor of Department of  
"Chemical Technology"  
E-mail: [khristoforova-i@mail.ru](mailto:khristoforova-i@mail.ru)

### **E. Yadykina**

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir  
Master of Department of Chemical Technology  
E-mail: [lenok\\_3012@bk.ru](mailto:lenok_3012@bk.ru)

ЩЕПОЧКИНА Ю.А.

## КАКОЙ КЕРАМИЧЕСКИЙ КИРПИЧ ВЫБРАТЬ: ПОЛНОТЕЛЫЙ ИЛИ ПУСТОТЕЛЫЙ?

*Данная статья посвящена вопросу выбора между полнотелым и пустотелым керамическим кирпичом, используемым для нужд строительства. Исследован международный опыт. Рассмотрен процесс размораживания кладки из полнотелого и пустотелого керамического кирпича. Для расчета кинетики размораживания (до 0 °C) промерзшей кладки в один кирпич использована компьютерная программа. Воздействие температуры на образец идет сверху, боковые и нижняя стороны образца теплоизолированы, температурное поле одномерно. Показано, что размораживание кладки из полнотелого кирпича будет протекать несколько быстрее, чем кладки из пустотелого кирпича.*

**Ключевые слова:** полнотелый и пустотелый керамический кирпич, кирпичная кладка, размораживание

Керамический кирпич – прочный, долговечный, экологически безопасный, по существу, незаменимый строительный материал. На долю керамического кирпича и стеновых камней приходится более половины общего объема производства стеновых материалов [1]. Проявляются тенденции к увеличению производства керамического кирпича. Только в январе-мае 2011 года общий объем производства керамического кирпича в России увеличился по отношению к соответствующему периоду 2010 года на 20 %, составив 3308 млн условных единиц [2]. В общем объеме производства керамического кирпича увеличивается выпуск пустотелого кирпича.

Однако в последние годы мнения специалистов относительно целесообразности выпуска полнотелого и пустотелого кирпича разделились. Некоторые исследователи [3] считают, что пустотелый кирпич «...вреден для строительства: большие потери при транспортировке, снижение прочности стен, снижение облицовочных качеств, повышенный расход раствора, низкая морозоустойчивость». Другие исследователи [4] доказывают перспективность производства именно пустотелого кирпича.

Обратимся к зарубежному опыту. В европейских странах введены документы, касающиеся энергетической характеристики зданий, в частности нормативный документ [5]. В строительстве предпочтительно использование материалов и изделий с низким коэффициентом теплопроводности [6]. Так, например, в Польше «...независимо от выбранного материала коэффициент теплопроводности наружных стен не может быть выше 0,25 Вт/м °C» [7]. Для выполнения этих требований, безусловно, необходимо применение теплоизоляционных материалов и наиболее целесообразно применение пустотелого кирпича [8]. Отметим, что теплопроводность кладки из полнотелого кирпича составляет 0,47-0,56 Вт/м °C, а из пустотелого кирпича 0,35-0,47 Вт/м °C [3].

Но как поведет себя кладка из пустотелого и полнотелого керамического кирпича в условиях влияния низких температур? Кладка из пустотелого кирпича, сохраняется на протяжении многих лет (может сохраняться и на протяжении столетий), но если в пустоты попадает вода разрушение даже при небольших заморозках неизбежно. Существует, например, мнение, что пустотелый кирпич нельзя делать с внешней стенкой менее 3 см [3], поскольку при заморозках на таком кирпиче появляются отколы. Как показывают наши многолетние наблюдения, мнение [3] справедливо. Откалывается именно внешняя стенка пустотелого кирпича, рис.1.

Из этого следует, что в случае применения пустотелого керамического кирпича он должен быть надежно защищен от увлажнения. Перспективны, на наш взгляд, обработка кирпичной кладки гидрофобными веществами, глазурование пустотелого кирпича, оплавление его поверхности низкотемпературной плазмой до образования защитного стекловидного слоя.

Безусловно, эти мероприятия требуют дополнительных материальных затрат. Разрушения кладки из полнотелого кирпича также, в основном, связаны с периодическим воздействием влаги и низких температур.

В данной работе ставилась задача – изучить процесс размораживания промерзшей кладки из полнотелого и пустотелого кирпича.

Для расчета кинетики размораживания (до 0 °C) промерзшей кладки в один кирпич нами использована программа [9], функционирующая в среде Windows 95/98/NT. Такая программа изначально была разработана для расчета распределения температур в бесконечной плоской пластине в любой заданный момент времени. Воздействие температуры на образец идет сверху, боковые и нижняя стороны образца теплоизолированы, температурное поле одномерно. Результаты расчетов приведены на рисунок 2.



Рисунок 1 – Разрушенная кладка из пустотелого кирпича (кладка выполнена в 90-е годы XX века)

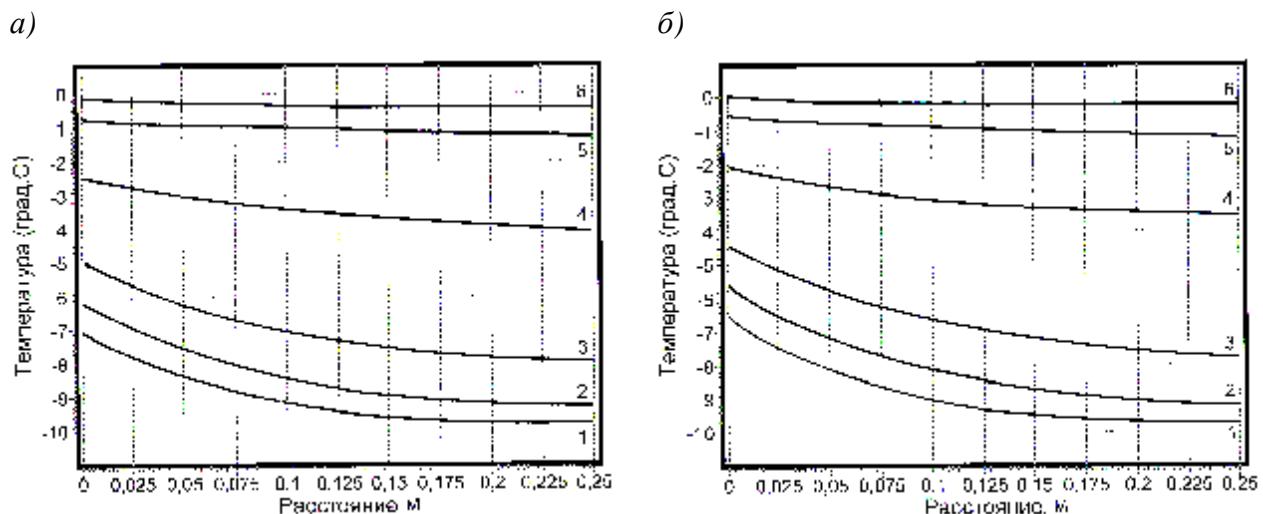


Рисунок 2 – Распределение температур в кладке: а – из полнотелого кирпича; б – из пустотелого кирпича. Время размораживания: 1 – 6 ч; 2 – 12 ч; 3 – 1 сут; 4 – 3 сут; 5 – 6 сут; 6 – 9 сут

Как видно из рисунок 2,а, при температуре наружного воздуха 0 °C размораживание кладки из полнотелого кирпича, охлажденной до -10 °C, происходит через 9 суток. Естественно, что при более высоких температурах наружного воздуха (выше 0 °C) процесс размораживания кладки ускорится. Внешняя стенка пустотелого кирпича в кладке будет разморожена аналогичным образом на всю ее толщину, далее процесс размораживания незначительно замедлится (рис. 2 б). Практически полное размораживание охлажденной до -10 °C кладки из пустотелого кирпича, как и кладки из полнотелого кирпича будет достигнуто через 9 сут.

Таким образом, при решении вопроса о выборе керамического кирпича целесообразно учитывать, что кладка из полнотелого кирпича размораживается несколько быстрее, чем кладка из пустотелого (более выгодного в отношении сбережения тепла) кирпича.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черных, В.Ф. Стеновые и отделочные материалы [Текст] / В.Ф. Черных. – М.: Росагропромиздат, 1991. – 188 с.
2. Кириллов, А. Кирпичный дом – больше чем дом [Текст] / А. Кириллов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2011. – № 10. – С. 19-21.
3. Шлегель, И.Ф. Эффективен ли пустотелый кирпич? [Текст] / И.Ф. Шлегель // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С. 41-43.
4. Murat, R. Pustaki ceramiczne – prawdy i mity [Text] / R. Murat // Murator. – 2014. – N 5. – S. 112-120.
5. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. OJ L 153, 18.6.2010, p. 13–35 (EN).
6. Babik, W. Nowe wymagania cieplne dla budunków [Text] / W. Babik // Ceramika budowlana. – 2014. - Nr 1-2. - S. 11-15.
7. Podwysocka, Z. Najlepsza ściana zewnętrzna [Text] / Z. Podwysocka // Murator. - 2015.- N 4. - S. 72-73.
8. Podwysocka, Z. Pustaki na żebrych [Text] / Z. Podwysocka // Murator. - 2015.- N 2. - S. 68-70.
9. Программа расчета температурных полей в образце бетона, покрытом смесью для глазурования («Глазурь») / С.В. Федосов, С.А. Игнатьев, М.В. Акулова, Ю.А. Щепочкина. – № ОФАП 1910, № гос. регистрации 50200200168. – 2002.

### Ю.А. Щепочкина

Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново  
доктор технических наук, профессор кафедры «Строительное материаловедение,  
специальные технологии и технологические комплексы»  
E-mail: [julia2004ivanovo@yandex.ru](mailto:julia2004ivanovo@yandex.ru).

---

Ju. SHCHEPOCHKINA

## WHAT CERAMIC BRICK TO CHOOSE: SOLID OR HOLLOW?

*This article is devoted to the question of the choice between solid and hollow ceramic bricks, which are used for structures. The international experience is studied. The process of defrosting masonry solid and hollow ceramic bricks is described. To calculate the kinetics of thawing (up to 0 °C) a frozen one brick laying it is used computer program. The effect of temperature on the brick comes from the top, other sides of the specimen thermally insulated, the temperature field is one-dimensional. It is shown that the thawing of masonry bricks will flow slightly faster than masonry hollow brick.*

**Keywords:** solid and hollow ceramic brick, brickwork, thawing

## BIBLIOGRAPHY

1. Chernykh, V.F. Stenovyye i otdelochnyye materialy [Tekst] / V.F. Chernykh. – M.: Rosagropromizdat, 1991. – 188 s.
2. Kirillov, A. Kirpichnyy dom – bol'she chem dom [Tekst] / A. Kirillov // Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka. – 2011. – № 10. – S. 19-21.
3. Shlegel', I.F. Effektiven li pustotelyy kirkich? [Tekst] / I.F. Shlegel' // Stroitel'nyye materialy. – 2006. - № 7. – S. 41-43.
4. Murat, R. Pustaki ceramiczne – prawdy i mity [Text] / R. Murat // Murator. – 2014. – N 5. – S. 112-120.
5. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. OJ L 153, 18.6.2010, p. 13–35 (EN).
6. Babik, W. Nowe wymagania cieplne dla budunków [Text] / W. Babik // Ceramika budowlana. – 2014. - Nr 1-2. - S. 11-15.
7. Podwysocka, Z. Najlepsza ściana zewnętrzna [Text] / Z. Podwysocka // Murator. - 2015.- N 4. - S. 72-73.
8. Podwysocka, Z. Pustaki na żebrych [Text] / Z. Podwysocka // Murator. - 2015.- N 2. - S. 68-70.
9. Программа расчета температурных полей в образце бетона, покрытом смесью для глазурования («Глазурь») / С.В. Федосов, С.А. Игнатьев, М.В. Акулова, Ю.А. Щепочкина. – № ОФАП 1910, № гос. регистрация 50200200168. – 2002.

### Ju. Shchepochkina

Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo  
Doctor of technical science, professor of department “Building materials technology and special technologies”  
E-mail: [julia2004ivanovo@yandex.ru](mailto:julia2004ivanovo@yandex.ru).

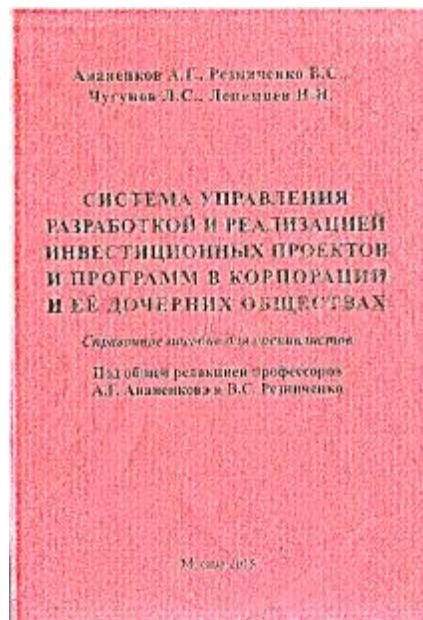
## РЕЦЕНЗИЯ НА КНИГУ «СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКОЙ И РЕАЛИЗАЦИЕЙ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ И ПРОГРАММ В КОРПОРАЦИИ И ЕЁ ДОЧЕРНИХ ОБЩЕСТВАХ»

Ананенков А.Г., Резниченко В.С., Чугунов Л.С., Ленинцев Н.Н. Система управления разработкой и реализацией инвестиционных проектов и программ в корпорации и её дочерних обществах: Справочное пособие для специалистов. – 2-е изд., доп. и перераб. Под общ. ред. профессоров А.Г.Ананенкова и В.С.Резниченко М.: Издательство «Спутник+», 2015. 518 с.

Общепризнанна потребность во всеобъемлющем описании теории и практики управления инвестиционными проектами с учетом мирового опыта крупных корпораций, осуществляющих реализацию крупномасштабных, высокотехнологичных проектов и программ, а также требований международных стандартов на основе системных подходов к определению их объективной стоимости и социально-экономической эффективности с привлечением иностранных инвестиций. Введение рациональных цен в строительстве, оптимизация на их базе уровня капитальных вложений, критически важны в естественных монополиях России, являющихся крупными инвесторами и застройщиками, в частности, для нефтегазового сектора экономики. Особенно остро названные проблемы встают при реализации крупномасштабных высокотехнологичных инвестиционных проектов в труднодоступных и малонаселенных регионах, особенно на полуострове Ямал, Восточной Сибири и Дальнем Востоке, полуострове Камчатка и острове Сахалин, в которых длительное время остро ощущается недостаток рабочей силы, доминируют сложные природно-климатические и другие условия осуществления строительства.

Первое издание книги – результат уникальной пятнадцатилетней деятельности авторского коллектива (Резниченко В.С. Ананенков А.Г., Чугунов Л.С., Ленинцев Н.Н., Ким А.И., Павлов В.В.), возглавляемого вице-президентом Российской инженерной академии, советником Российской академии архитектуры и строительных наук Резниченко В.С., - явилось крепким фундаментом для удовлетворения именно этой потребности. Широкое признание и использование первого издания справочного пособия в практике управления инвестиционной деятельностью многих корпораций служит доказательством того, что оно выполнило свою задачу.

*Во втором издании сохранена общая структура книги. Книга состоит из двух разделов.* В первом ее разделе рассматриваются основы управления инвестиционными процессами, включающей как методологию управления проектами (объекты управления), так и методологию управления инвестиционной деятельностью корпорации и ее дочерних обществ (субъекты управления), включая их организационную структуру. Второй раздел книги посвящен практическим рекомендациям по совершенствованию практики управления инвестиционными процессами с описанием корпоративных регламентов, методик, норм и нормативов, которые могут использоваться кор-



порациями для повышения эффективности своей деятельности. Указанные рекомендации учитывают передовой мировой опыт и современное российское законодательство.

Во втором издании книги рассматриваются, во-первых, предложения по совершенствованию российского законодательства в области управления инвестиционными процессами и, во-вторых, приведению существующей практики инвестиционно-строительной деятельности в соответствие с действующими руководящими документами. *Второе издание книги дополнено четырьмя новыми главами, а старые главы переработаны и обогащены новыми современными материалами, в т.ч. по реализации новых инвестиционных проектов и программ.* Это позволило отразить дополнительный опыт, накопленный за прошедшие годы топ-менеджерами высшего звена, руководителями функциональных подразделений корпораций и ее дочерних обществ, а также менеджерами конкретных инвестиционных проектов, входящих в соответствующие команды.

*В частности, во втором издании книги рассмотрены следующие новые аспекты:*

1. Более глубоко рассмотрен системный подход по декомпозиции системы управления инвестиционными процессами, прежде всего, по декомпозиции системы управления инвестиционной деятельностью корпорации и ее дочерних обществ. Разработанная декомпозиция системы легла в основу обоснования предлагаемой прикладной информационной системы для повышения эффективности управления инвестиционными процессами, совершенствования организационной структуры управления инвестиционной деятельностью корпорации и решении других актуальных вопросов;

2. Впервые рассмотрена методология и практика совершенствования организационных структур корпораций и их дочерних обществ, направленные на повышение эффективности их инвестиционной деятельности. Рассмотрены различные варианты оптимизации организационных структур корпораций и их дочерних обществ, особое внимание при этом уделено развитию матричной структуры управления, разработке и соблюдению нормативов управляемости;

3. Отдельная глава книги посвящена методологии создания эффективных информационных систем для совершенствования управления инвестиционной деятельностью корпораций и их дочерних обществ. При этом главное внимание уделено не столько оптимизации выбора информационной платформы, сколько глубине решения прикладных функциональных задач и унификации циркулируемой в системе управления технико-экономической информации (документооборота). Применен системный подход увязки функциональных прикладных задач на основе унифицированного для корпораций и их дочерних обществ информационного обеспечения, базирующаяся на единой системе классификации и кодирования технико-экономической информации;

4. Отдельная глава книги посвящена методологии обоснования достоверности, необходимой точности и преемственности инвестиционных расчетов на всех стадиях жизненного цикла инвестиционных проектов. Новизна предлагаемых подходов и моделей заключается в том, что они позволяют существенно повысить точность сметных, плановых и других инвестиционных расчетов, обеспечивающих возможность перехода на твердые договорные цены, более аргументированное формирование инвестиционных и подрядных договоров. При этом особый акцент сделан на методологию разработки и реализации крупномасштабных высокотехнологичных инвестиционных проектов, осуществляемых в труднодоступных регионах РФ со сложными природно-

климатическими условиями, особенно при реализации инвестиционных проектов нефтегазовой промышленности. Важно отметить, что предлагаемые механизмы обеспечивают большую сходимость проектно-сметной информации с планово-договорной, что соответствует передовому мировому опыту и позволяет сделать эффективный шаг вперед в отечественной практике, где сметные и плановые показатели зачастую существенно отличаются, особенно на предварительных стадиях проектирования и годового (двух, трех) летнего планирования инвестиционной деятельности корпорации;

5. Более глубоко рассмотрена глава о порядке ценообразования и определения затрат по инвестиционному проекту в целом и стоимости строительной продукции в частности для различных стадий инвестиционных расчетов. Рассмотрены механизмы повышения обоснованности, точности и преемственности сметных расчетов и формирования укрупненных удельных показателей стоимости строительства для различных объектов-представителей, регионов РФ и условий строительства. Приведены современные, обновленные удельные стоимостные показатели (в ценах 2010г.) строительства наиболее капиталоемких нефтегазовых объектов для большинства регионов РФ;

6. Более подробно рассмотрен полный жизненный цикл инвестиционного проекта, включая прединвестиционные и предпроектные работы, финансирование (с переводом проекта в инвестиционную фазу), проектирование и строительство объектов производственного назначения. В этой связи даны рекомендации по совершенствованию российского законодательства, в особенности, по производственно-экономическим вопросам при реализации крупномасштабных инвестиционных проектов, а также приведения практической деятельности участников инвестиционного проекта, инвесторов, застройщиков, заказчиков и подрядчиков капитального строительства в соответствии с руководящими нормативными документами;

7. Отдельный материал посвящен особенностям ценообразования по крупномасштабным и территориально удаленным стройкам, включая актуальные вопросы проектирования, ценообразования, строительства, регистрации, эксплуатации, налогообложения и учета временных зданий и сооружений, на примере нефтегазового строительства, в особенности при сооружении магистральных трубопроводов и обустройстве нефтегазоконденсатных месторождений.

В книге показано, что эффективное управление проектами и деятельностью корпораций в инвестиционной сфере требует, во-первых, отказа от некоторых старых привычек и методов управления и перехода на новые способы достижения поставленных целей в срок и в рамках рационального бюджета. И, во-вторых, обеспечение рационального бюджета и минимизация затрат на реализацию инвестиционных проектов могут быть достигнуты на основе дальнейшего совершенствования инвестиционной деятельности корпораций в синхронизации с реформированием экономики и социальной сферы страны в целом. Экономические и другие интересы работников корпораций и ее дочерних обществ должны быть направлены на повышение эффективности ее деятельности (в том числе увеличение прибыли), а не на увеличение затрат, как зачастую это происходит в настоящее время в отдельных отечественных корпорациях.

Новые подходы, изложенные в книге, проиллюстрированы на материалах реальных инвестиционных проектов, что выгодно ее отличает от книг, в которых представлена только теория и методология разработки и принятия инвестиционных и других

управленческих решений. Вместе с тем для крупномасштабного внедрения предлагаемых в книге инноваций, как показывает многолетний практический опыт, необходим анализ и систематизация инвестиционной деятельности конкретной корпорации, а также осуществляемого в ней документооборота, с разработкой проектной документации поэтапного перевода ее деятельности на предлагаемую инновационную систему.

Авторы выражают большую признательность руководству и специалистам ОАО «Газпром» и его дочерних обществ, руководителям крупных научных школ профессорам А.А. Гусакову, В.М. Васильеву, Л.С. Андрееву, авторитетным в мире ученых и практиков профессорам Ю.П. Баталину, С.Н. Булгакову, П.Г. Грабовому, В.М. Серову за результаты совместной работы, которые учтены при подготовке книги.

***В заключение можно порекомендовать авторам следующие направления работы:***

- при заключении подрядных договоров и установлении договорных цен – учитывать подсистемы корпоративного лимитирования отдельных видов затрат как основу для оптимизации планов капитальных вложений;

- проблемы снижения стоимости крупномасштабного строительства решать в основном за счет повышения эффективности конкурсного отбора инвесторов, подрядчиков и поставщиков ресурсов и оборудования.

Некоторые предложения по определению содержания предложенной авторами инновационной системы управления инвестиционно-строительными проектами и программами на всех стадиях инвестиционного процесса являются дискуссионными и требуют проведения дальнейших исследований.

Высказанные замечания и пожелания не снижают достоинств рецензируемой книги. В целом она представляет собой уникальный вклад в решение научных и практических проблем ценообразования и управления стоимостью строительства для современной России, а также повышения эффективности планирования капитального строительства и управления инвестиционными проектами. Книга будет полезна работникам органов государственного управления, научных, проектных, строительных, снабженческих и других организаций, занятых в сфере инвестиционно-строительной деятельности, а также профессорско-преподавательскому составу вузов, аспирантам и студентам.

Д.Э.Н., проф. кафедры  
общего менеджмента и логистики,  
РАНХиГС

С.А. Владимиров

**Уважаемые авторы!**  
**Просим Вас ознакомиться с основными требованиями**  
**к оформлению научных статей**

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах **формата А4** и содержит от **4 до 9 страниц**; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья должна быть набрана шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.
- Статья предоставляется в **1 экземпляре** на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.**
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует присыпать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

**В тексте статьи** не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

**Обязательные элементы:**

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкого профессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** описывает цели и задачи проведенного исследования, а также возможности его практического применения, указывает, что нового несет в себе материал; рекомендуемый средний объем – 500 печатных знаков;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

**С полной версией требований к оформлению научных статей**  
**Вы можете ознакомиться на сайте [www.gu-unpk.ru](http://www.gu-unpk.ru)**

---

*Учредитель журнала*  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет –  
учебно-научно-производственный комплекс»  
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)

*Адрес учредителя журнала*  
302020, г. Орел, ул. Наугорское шоссе, 29

*Контактные данные учредителя*  
+7 (4862) 42-00-24  
[www.gu-unpk.ru](http://www.gu-unpk.ru)  
E-mail: [unpk@ostu.ru](mailto:unpk@ostu.ru)

*Адрес редакции*  
302006, г. Орел, ул. Московская, 77.

*Контактные данные редакции*  
+7 (4862) 73-43-49  
[www.gu-unpk.ru/science/journal/sir](http://www.gu-unpk.ru/science/journal/sir)  
E-mail: [str\\_and\\_rek@mail.ru](mailto:str_and_rek@mail.ru)

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор С.Ю. Савин  
Компьютерная верстка С.Ю. Савин

Подписано в печать 15.02.2016 г.  
Формат 70×108 1/16. Печ. л. 7,5.  
Тираж 400 экз.  
Заказ №\_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической  
базе ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.