

*Редакционный совет:*

**Пилипенко О.В.** д-р техн. наук., проф.,  
председатель  
**Голенков В.А.** д-р техн. наук, проф.,  
зам. председателя  
**Пузанкова Е.Н.** д-р пед. наук, проф.,  
зам. председателя  
**Радченко С.Ю.** д.т.н., проф.,  
зам. председателя  
**Борзенков М.И.** канд. техн. наук, доц.,  
секретарь  
**Авдеев Ф.С.** д-р пед. наук, проф.  
**Астафичев П.А.** д-р юрид. наук, проф.  
**Желткова И.В.** канд. филос. наук, доц.  
**Иванова Г.Н.** д-р техн. наук., проф.  
**Зомитова Г.М.** канд. экон. наук, доц.  
**Колчунов В.И.** д-р техн. наук., проф.  
**Константинов И.С.** д-р техн. наук, проф.  
**Косыкин А.В.** д-р техн. наук., проф.  
**Новиков А.Н.** д-р техн. наук., проф.  
**Попова Л.В.** д-р экон. наук., проф.  
**Уварова В.И.** канд. филос. наук, доц.

*Главный редактор:*

**Колчунов В.И.** акад. РААСН, д.т.н., проф.

*Заместители главного редактора:*

**Данилевич Д.В.** канд. техн. наук, доц.  
**Колесникова Т.Н.** д-р арх., проф.  
**Коробко В.И.** д-р техн. наук, проф.

*Редакколлегия:*

**Бок Т.** д-р техн. наук., проф. (Германия)  
**Бондаренко В.М.** акад. РААСН,  
д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Гордон В.А.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Емельянов С.Г.** чл.-корр. РААСН,  
д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Карпенко Н.И.** акад. РААСН, д-р техн. наук,  
проф. (Россия)  
**Коробко А.В.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Король Е.А.** чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,  
проф. (Россия)  
**Римшин В.И.** чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,  
проф. (Россия)  
**Сергейчук О.В.** д-р техн. наук, проф. (Украина)  
**Серпик И.Н.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Тамразян А.Г.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Тур В.В.** д-р техн. наук., проф. (Белоруссия)  
**Турков А.В.** д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Федоров В.С.** акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
(Россия)  
**Федорова Н.В.** советник РААСН,  
д-р техн. наук, проф. (Россия)  
**Чернышов Е.М.** акад. РААСН, д-р техн. наук,  
проф. (Россия)  
**Шах Р.** д-р техн. наук, 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.build.oreluniver.ru](http://www.build.oreluniver.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 №ФС 77-67169  
от 16 сентября 2016 г.

Подписной индекс **86294** по объединенному  
каталогу «Пресса России»

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2017

## Содержание

### Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Антошкин В.Д.** Конструкционно-технологическое формообразование оболочек из сборных плоских шестиугольных и треугольных панелей, размещенных в повторяющихся секторах сфер..... 3
- Голик В.И., Разоренов Ю.И.** Методы строительной механики при комбинировании горных технологий ..... 9
- Демьянов А.И., Сальников А.С., Колчунов В.И.** Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов ..... 17
- Колчунов В.И., Потапов В.В., Дмитриева К.О., Ильин В.А.** Расчетный анализ длительного деформирования системы «здание-основание» хранилища ядерных отходов АЭС ..... 27
- Коробко А.В., Вепринцева Н.В., Шляхов С.В.** Определение основной частоты колебаний мембран в виде круговых луночек ..... 34
- Курнавина С.О., Колганов А.А.** Оценка применимости консольной модели с распределенными параметрами для расчета каркасных зданий на сейсмические воздействия ..... 41
- Плевков В.С., Саркисов Д.Ю., Балдин С.В.** Анализ параметров колебательных процессов несущего каркаса производственного здания ..... 48
- Тамразян А.Г., Манаенков И.К.** Испытание трубобетонных образцов малого диаметра с высоким коэффициентом армирования ..... 57
- Травуш В.И., Конин Д.В., Крылов А.С., Каприелов С.С., Чилин И.А.** Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на изгиб ..... 63
- Трещев А.А., Ромашина А.В.** Напряженно-деформированное состояние пластины с круглым отверстием из материала с усложненными свойствами при растяжении ..... 72
- Федоров В.С., Шавыкина М.В., Юсупова Е.В.** Прогнозы железобетонных конструкций в предельном состоянии ..... 80

### Безопасность зданий и сооружений

- Ванус Д.С.** Прочность железобетонных балочных конструкций при учете деформирования арматуры как вантовой системы при действии особых динамических нагрузок ..... 87

### Архитектура и градостроительство

- Антонов А.И., Леденев В.И., Яровая Т.С.** Расчеты шума при акустическом благоустройстве в помещениях с массовым пребыванием людей ..... 94
- Енин А.Е., Грошева Т.И.** Системный подход к реконструкции ландшафтно-рекреационных пространств ..... 101

### Строительные материалы и технологии

- Султангузин И.А., Шютц У., Калякин И.Д., Говорин А.В., Яворовский Ю.В., Жигулина Е.В., Хромченков В.Г., Малахова А., Ланцке Б., Дамен А.** Расчёт, строительство и обследование фасада энергоэффективного дома ..... 110
- Федосов С.В., Левашов Н.Ф., Акулова М.В., Потемкина О.В.** Перспективы применения комплексного метода анализа поведения цементных композитов в условиях воздействия повышенных температур ..... 119
- Щепочкина Ю.А., Быков И.А.** Модификация мелкозернистого бетона добавками измельченной пластмассы ..... 129

## Editorial council:

**Pilipenko O.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
President  
**Golenkov V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
Vice-president  
**Puzankova E.N.** Doc. Sc. Ped., Prof.,  
Vice-president  
**Radchenko S.Y.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
Vice-president  
**Borzenkov M.I.** Candidat Sc. Tech.,  
Docent, Secretary  
**Astafichev P.A.** Doc. Sc. Law., Prof.  
**Avdeyev F.S.** Doc. Sc. Ped., Prof.  
**Ivanova T.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Kolchunov V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Konstantinov I.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Koskin A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Novikov A.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Popova L.V.** Doc. Ec. Tech., Prof.  
**Uvarova V.I.** Candidat Sc. Philos.,  
Docent  
**Zheltikova I.V.** Candidat Sc. Philos.,  
Docent  
**Zomiteva G.M.** Candidate Sc. Ec., Docent

## Editor-in-chief

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

## Editor-in-chief assistants:

**Danilevich D.V.** Candidat Sc. Tech., Docent.  
**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.  
(Russia)  
**Gordon V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Emelyanov S.G.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Karpenko N.I.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Korobko A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Korol E.A.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Rimshin V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Sergeyev O.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)  
**Serpik I.N.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Tamrazyan A.G.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
(Russia)  
**Tur V.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Belorussia)  
**Turkov A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Fedorov V.S.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Fedorova N.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Chernyshov E.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
(Russia)  
**Schach R.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Germany)

## Responsible for edition:

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

## The edition address:

302006, Orel, Moskovskaya Street, 77  
+7 (4862) 73-43-49  
[www.build.oreluniver.ru](http://www.build.oreluniver.ru)  
E-mail: [str\\_and\\_rek@mail.ru](mailto:str_and_rek@mail.ru)

Journal is registered in Russian federal service for  
monitoring communications, information technol-  
ogy and mass communications

The certificate of registration:

ПН №ФЦ 77-67169 from 16.09.2016 r.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»  
**86294**

© Orel State University, 2017

## Contents

### Theory of engineering structures. Building units

<b>Antoshkin V.</b> Structural and technological forming of shells on the basis of flats regular hexagon and triangle panels placed in the repeated sphere sectors.....	3
<b>Golik V.I., Razorenov Yu.I.</b> Methods of structural mechanics when combining mining technologies .....	9
<b>Dem'yanov A.I., Salnikov A.S., Kolchunov V.I.</b> The experimental studies of reinforced concrete constructions in torsion with bending and the analysis of their results .....	17
<b>Kolchunov V.I., Potapov V.V., Dmitrieva K.O., Iliin V.A.</b> Design analysis of the long-term de-formation of the system "build-based" the storage of nuclear wastes of NPPS .....	27
<b>Korobko A., Veprintseva N., Shlyakov S.</b> Determination of the membranes fundamental frequency of oscillations circular lunettes .....	34
<b>Kurnavina S.O., Kolganova A.A.</b> Evaluation of applicability of a cantilever with distributed parameters as a design model of reinforced concrete frames under seismic loads .....	41
<b>Plevkov V.S., Sarkisov D.Yu., Baldin S.V.</b> Analysis of parameters of vibrational processes of the carrying framework of the industrial building .....	48
<b>Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K.</b> Testing of small-diameter pipe-concrete samples with a high reinforcement factor .....	57
<b>Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S., Kaprielov S.S., Chilin I.A.</b> Experimental study of composite structures for bending elements .....	63
<b>Treshchev A.A., Romashina A.V.</b> The stress-strain state of a plate with a round hole from a material with complex properties tensile .....	72
<b>Fedorov V.S., Shavykina M.V., Yusupova E.V.</b> Definition of reinforced concrete structures in limit state .....	80

### Building and structure safety

<b>Vanus D.S.</b> Strength of reinforced concrete structures at the account of the deformation of the reinforcement as a vante system in action of special dynamic loads .....	87
--	----

### Architecture and town-planning

<b>Antonov A.I., Ledenev V.I., Yarovaya T.S.</b> Calculation of noise in acoustic improvement in premises with the mass stay of people .....	94
<b>Enin A.E., Grosheva T.I.</b> A systematic approach to the reconstruction of the landscape-recreational spaces .....	101

### Construction materials and technologies

<b>Sultangazin I., Winfried SCH., Kalyakin I., Govorin A., Yavoriv YU., Khromchenkov V., Zhigulina E., Malakhova A., Damen A., Lanzke B.</b> Calculation, construction and survey of the front of the energy efficient house .....	110
<b>Fedosov S., Levashov N., Akulova M., Potemkina O.</b> Prospects of application of integrated method of analysis of behavior of cement composites in conditions of influence of heightened temperature .....	119
<b>Shchepochkina J.A., Bykov I.A.</b> Modification of fine-grained concrete additives crushed plastic .....	129

## **КОНСТРУКЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ОБОЛОЧЕК ИЗ СБОРНЫХ ПЛОСКИХ ШЕСТИУГОЛЬНЫХ И ТРЕУГОЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ, РАЗМЕЩЕННЫХ В ПОВТОРЯЮЩИХСЯ СЕКТОРАХ СФЕР**

*Рассмотрены вопросы конструктивно-технологического формообразования сферических оболочек на основе радиально-кольцевой сети. Исследован один из нескольких конструктивно-технологических методов образования треугольных сетей на сфере, которые были названы «Транер». В каждом из них критерием оптимальности является минимальное число типоразмеров конструктивных деталей и минимальное число монтажных элементов купола, возможности укрупнительной сборки и предварительного напряжения. Исследованы теоретические предпосылки размещения панелей в виде правильных шестиугольников на составных сферических оболочках. Определено, что поверхность оболочки имеет положительную гауссову кривизну для приведенного порядка расположения панелей и требует специфических конструкций монтажных узлов.*

**Ключевые слова:** сборная сферическая оболочка, конструктивно-технологическая форма, панель, правильный шестиугольник, разрезка, пространственная конструкция.

В данной работе исследованы теоретические предпосылки размещения панелей в виде правильных шестиугольников с треугольными панелями между ними на составных сферических оболочках. Известно, что радиально-кольцевой основе одной сферы можно разместить только чуть больше 50% правильных шестиугольников с треугольниками между ними, остальные плоские шестиугольники можно выполнить только неправильными [1-4, 7]. Однако если из каждой сферы с одинаковым радиальным раскроем, но разным радиусами можно вырезать ряды с правильными шестиугольниками и совместить по кольцевым линиям, то получится составная оболочка вращения.

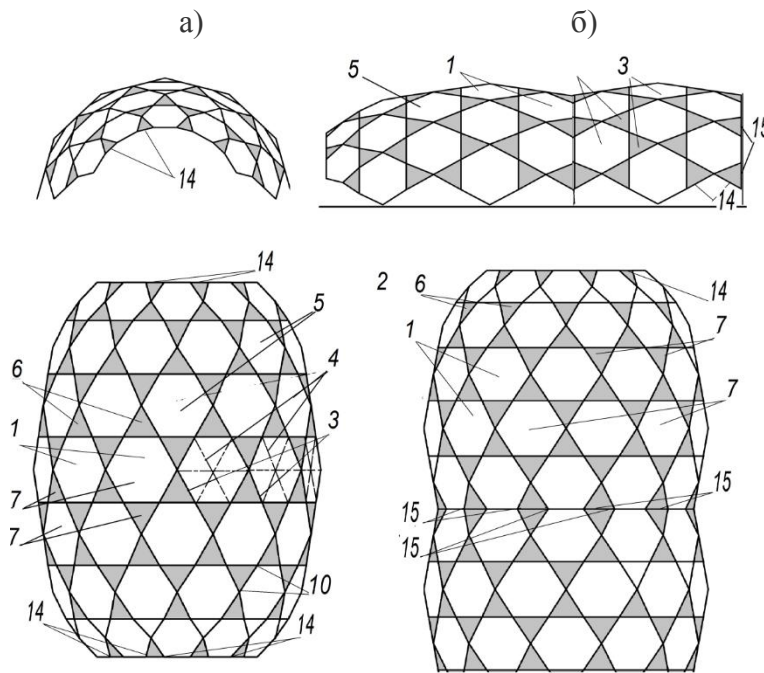
В такой составной сборной оболочке, соединенные между собой шестиугольные панели, эти панели уже могут быть выполнены в виде плоских правильных шестиугольников, между которыми установлены треугольные панели (приоритет от 07.06.2017 № 2017119859). Шестиугольные и треугольные панели с разными размерами в каждом ряду, расположенные в одном определенном порядке образуют поверхности вращения положительной гауссовой кривизны (рис. 1 а и б).

Составная сборная оболочка положительной гауссовой кривизны (рисунок 1) выполнена в виде сборной конструкции их шестиугольных панелей 1 с узловыми элементами 2, с каркасом из бортовых 3 и внутренних 4 ребер и с обшивкой 5. Панели 1 выполнены в виде несущих каркасных плоских правильных шестиугольников 1 (либо панелей-оболочек), между которыми установлены треугольные панели 6. Шестиугольные 1 и треугольные 6 панели с разными размерами в каждом ряду, расположенные в одном порядке панели 7 образуют поверхности вращения положительной гауссовой кривизны.

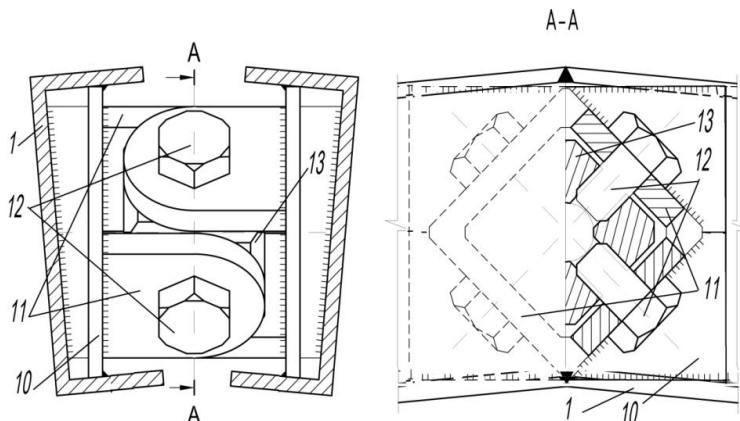
Сстыкованная из составных сборная оболочка положительной гауссовой кривизны (рис. 1 б) также выполнена в виде сборной конструкции их шестиугольных панелей с узловыми элементами, с тем отличием, что она представляет собой две или несколько сомкнутых поверхностей положительной кривизны.

Для сборки составной оболочки к узлам 2 (рисунок 1) панелей крепятся узловые фасонки контурных стержней 14, к которым прикреплены парные проушины под углом около 45 градусов к плоскости панели 1, для соединения смежных монтажных элементов 1 и 14 между собой в одном из узлов стержня 14 между проушинами 11 установлен и закреплен с возможностью поворота болтами 12 узловой вкладыш 13 (рисунок 2).





**Рисунок 1 - Виды сбоку и сверху сборных оболочек положительной гауссовой кривизны:**  
**а - одинарной составной, б-составной(смянутой)**



**Рисунок 2 - Узловое соединение для купольных покрытий с каркасными панелями**

Для стыковки составной сборной оболочки, собираемой из одинарных оболочек к узлам 2 (рисунок 1) панели крепятся стыковочные стержни 15 с узловыми фасонками 10 с обеих сторон этих стыковочных стержней. Для монтажных стыков панелей и и соединения контурных 14 и стыковочных стержней 15 разработан один унифицированный тип соединения (рисунок 2). Он позволяет обеспечить небольшой поворот при присоединении панелей.

В сечении элементов каркаса возникают в основном сжимающие напряжения, а растягивающие напряжения близки к нулю. В этом случае влияние концентраций растягивающих напряжений весьма мало, что повышает надежность работы элемента. Присоединение стержней контура и стыковочных стержней сборной оболочки к узлам 2 (рисунок 2) панелей происходит в таком же порядке, так как концевые детали у них используются такие же.

Соединение деревянных элементов в узлах выполняется с помощью вклеенных стальных концевых деталей [6] и показанные узловые соединения на шарнирах-болтах. В сетчатых куполах несущие элементы примыкают друг к другу под различными углами, поэтому в случае выполнения узловых деталей многоугольной

формы требуется несколько типоразмеров таких деталей. Отклонения фактических продольных и угловых размеров деревянных и стальных элементов от проектных должны быть минимальными, поэтому изготовление элементов и укрупнение в монтажные панели рекомендуется производить в специальных кондукторах.

При монтаже сборного покрытия способом «подъема с поворотом конструкции в целом» [5] могут использоваться также реечные домкраты для пролетов до 12 м. При больших пролетах можно использовать гидравлические домкраты, которые либо имеют эксцентриситет опирания, либо устанавливаются наклонно. Вначале собираются первые ряды опорных элементов. Далее собираются ряды панелей для придания жесткости собранной части. Собранная часть поднимается с поворотом вокруг монтажных опор в положение для установки следующих монтажных панелей. Затем сборка продолжается с последующими поворотами. В завершение купол устанавливается в проектное положение на опорные элементы противоположного ряда и заменяются монтажные опоры на рабочие опорные элементы.

Проанализируем какую поверхность образуют окружности или соответствующие им правильные шестиугольники, соединенные через треугольники. Применение таких окружностей минимальных радиусов обеспечивает минимальные длины стержней и равномерную передачу усилий в стержнях, за счет минимизации размеров монтажных элементов (и за счет изменений направлений преимущественно сжатых элементов купола).

Для построения разрезки составной оболочки из плоских правильных шестиугольников и треугольников (рисунок 3, а, б), воспользуемся уже известным построением правильных шестиугольников через ряд [8-14]. На первом этапе определим центры шестиугольников, вписанных в окружности минимальных радиусов, регулярно расположенных относительно экватора сферы. В этом случае, эти окружности только касаются друг друга в одной точке по вертикальной правой оси-меридиана (см. рисунок 4, а, б).

Учитывая, что сектор образован неизменным центральным углом вращения  $r_1 = 360^\circ/n$ , составим алгоритм расчета координат узлов и радиусов правильных шестиугольников неравных радиусов на поверхности вращения из секторов  $r_1-90-90^\circ$ . Определяем положение координат узлов и радиусов правильных шестиугольников для поверхности, составленной из сегментов сфер вращения с начальным радиусом  $R_0 = R_{01}$ . Для расчета параметров составной оболочки из сферических колец задаем начальные условия (рис.3):

$$1) R_1 = R_0; a^0 = r_1^0 = 360^\circ/n; n = 24; r_1 = R_1 \sin(360^\circ/n),$$

тогда координаты первого узла

$$x_1 = 0; y_1 = R_1 \sin(360^\circ/n); z_1 = R_1 \cos(360^\circ/n);$$

где  $R_0$  – радиус начальной сферы,  $a^0 = r_1^0$  – угол сектора с повторяющимися элементами,  $n$  – целое число делений начальной сферы;  $r_1$  – радиус плоского правильного шестиугольника или его сторона.

$$2) x_{12} = x_1 + R_1 \cos 30^\circ \sin(360^\circ/n); y_{12} = 0,5r_1;$$

$$z_{12} = R_1 \cos 30^\circ \cos(360^\circ/n);$$

$$R_{12} = R_1 \cos(\arcsin(x_{12}/R_1));$$

$$r_2 = 2R_{12} \sin(360^\circ/n - (\arcsin(0,5r_1/R_{12})));$$

$$R_2 = r_2 / \sin(360^\circ/n); R_{02} = R_2 \cos(360^\circ/n);$$

$$R_{22} = (R_{02} + R_2)/2;$$

$$3) x_2 = x_{12} + r_2 \cos 30^\circ \cos(\arcsin((R_{12} - R_{22})/r_2 \cos 30^\circ));$$

$$y_2 = 0; z_2 = R_2;$$

$$R_{23} = 2R_{22} - R_{12};$$

$$4) x_{23} = x_{12} + 2r_2 \cos 30^\circ \cos(\arcsin(2R_{12} - R_{22})/r_2 \cos 30^\circ);$$

$$y_{23} = R_{23} \sin(\sin(360^\circ/n) - \arcsin(0,5r_2/R_{23}));$$

$$z_{23} = R_{23} \cos(\sin(360^\circ/n) - \arcsin(0,5r_2/R_{23}));$$

$$r_3 = 2R_{23} \sin(360^\circ/n - (\arcsin(0,5r_2/R_{23})));$$

$$R_3 = r_3 / \sin(360^\circ/n); R_{03} = R_3 \cos(360^\circ/n);$$

$$R_{33} = (R_3 + R_{03})/2;$$

$$5) x_3 = x_{23} + r_2 \cos 30^\circ (\arcsin(R_{23} - R_{03})/r_2 \cos 30^\circ);$$

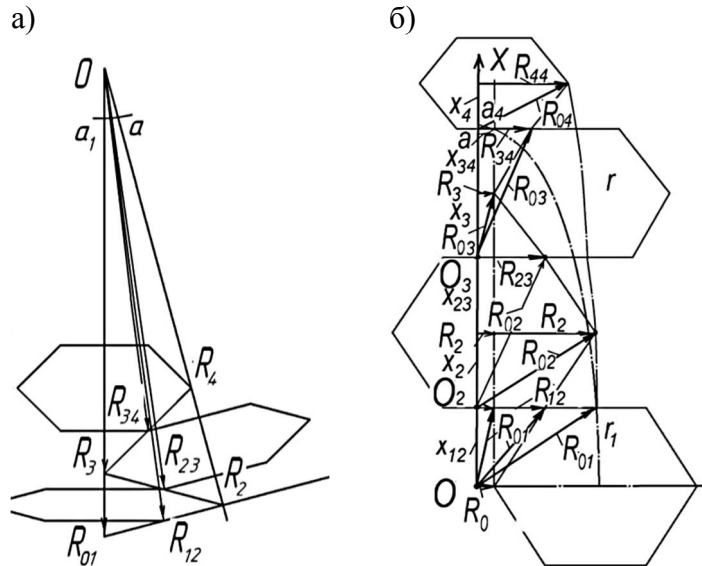


Рисунок 3 - Определение координат узлов и радиусов правильных шестиугольников неравных радиусов на поверхности вращения из секторов  $r_1-90-90^\circ$ , а – вид сверху на сектор сетчатой оболочки; б – вид сбоку

$$y_3 = R_3 \sin(\sin(360^\circ / n)); \quad z_3 = R_3 \cos(\sin(360^\circ / n));$$

$$R_{34} = 2R_{33} - R_{23}.$$

Для завершающего этапа в общем виде координаты и радиусы можно выразить следующими формулами:

$$6) x_i = x_{i-1,i} + 0,5 r_{i-1} \cos 30^\circ (\operatorname{acrsin}(R_{i-1,i} - R_{0,i}) / r_{i-1} \cos 30^\circ); \quad (1)$$

$$y_i = R_i \sin(\sin(360^\circ / n));$$

$$z_i = R_i \cos(\sin(360^\circ / n));$$

$$R_{i,i+1} = 2R_{i,i} - R_{i-1,i};$$

$$7) x_{i,i+1} = r_{i+1} \cos 30^\circ \cos(\operatorname{acrsin}(R_{i,i+1} - R_{i+1,i+1}) / r_{i+1} \cos 30^\circ); \quad (2)$$

$$y_{i,i+1} = R_{i,i+1} \sin(\sin(360^\circ / n - \operatorname{acrsin}(0,5 r_{i+1} / R_{i,i+1})));$$

$$z = R_{i,i+1} \cos(\sin(360^\circ / n - \operatorname{acrsin}(0,5 r_{i+1} / R_{i,i+1})));$$

$$r_3 = 2R_{i,i+1} \sin(360^\circ / n - \operatorname{acrsin}(0,5 r_2 / R_{i,i+1}));$$

$$R_{i+1} = r_{i+1} / \sin(360^\circ / n); \quad R_{0,i+1} = R_{i+1} \cos(360^\circ / n);$$

$$R_{i+1,i+1} = 0,5(R_{i+1} + R_{i,i+1}).$$

**Пример.** Для координат узлов и радиусов правильных шестиугольников неравных радиусов на поверхности вращения из секторов  $\gamma_1$ -90-90° и для условий в п.1 определим параметры.

$$1) R_1 = 1; n = 24; r_1 = 15^\circ; r_1 = 0,25881904510252076.$$

$$x_1 = 0; y_1 = 0,2588190451025; z_1 = 0,965925826289.$$

$$2) x_{12} = 0,22414386804201338; y_{12} = 0,12940952255126038;$$

$$z_{12} = 0,8365163037378;$$

$$R_{12} = 0,974556066329; r_2 = 0,2500000000000;$$

$$R_2 = 0,965925826289; R_{02} = 0,93301270189; R_{22} = 0,94946926409$$

$$3) x_2 = 0,4391918914076; y_2 = 0; z_2 = 0,965925826289;$$

$$R_{23} = 0,924382461851;$$

$$4) x_{23} = 0,65423991477; y_{23} = 0,1163095335024;$$

$$z_{23} = 0,91703600158018;$$

$$r_3 = 0,2326190670048; R_3 = 0,8987710580288; R_{03} = 0,86814617687118;$$

$$R_{33} = 0,89626431936109.$$

Из рисунка 4 видно, что правильные сферические шестиугольники, вписанные в окружности наименьшего радиуса [8-16] и размещенные в одном угловом секторе и размещенные в только заданном порядке с треугольными панелями образуют поверхность положительной гауссовой кривизны.

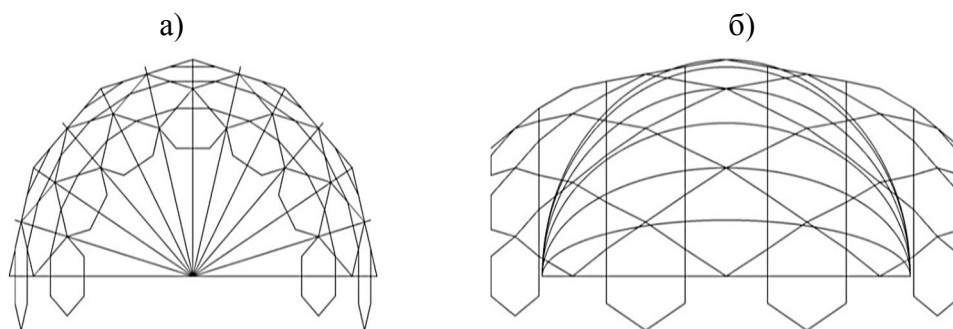


Рисунок 4 - Сетчатая оболочка, полученная из правильных шестиугольников неравных радиусов на поверхности вращения из секторов  $\gamma_1$ -90-90°

**Выводы.** Разработаны методы конструктивно-технологического формообразования на стадии геометрии разрезов составных сборных сферических оболочек в виде секторов из панелей в виде правильных шестиугольников. а также вариант конструктивного решения монтажных соединений. Такие несущие конструкции подобной разрезки могут быть применены, как в покрытиях зданий, так и в стеновых ограждающих и несущих пространственных конструкциях различных зданий и сооружений (высотных зданиях, башнях, градирнях и т.п.).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Antoshkin V.D. The problem optimization triangular geometric line field [Text] / V.D. Antoshkin, V.I. Travush, V.T. Erofeev, V.I. Rimshin, V.L. Kurbatov // Modern Applied Science. – 2015. - Т. 9. - № 3. – С. 46-50.
2. Антошкин, В.Д. Эффективные конструктивно-технологические решения сборных сферических куполов [Текст] / В.Д. Антошкин // Региональная архитектура и строительство. – 2015. - № 3 (24). –С. 112-121.
3. Антошкин, В.Д. Перспективные конструктивно-технологические решения сборных сферических оболочек [Текст] / В.Д. Антошкин, С.С. Гудожников, О.И. Перфильева, И.В. Ерофеева // «Актуальные вопросы архитектуры и строительства». Материалы Тринадцатой Международной научно-технической конференции: в 2 частях. –2014. – С. 4-15.
4. Антошкин, В.Д. Сборные сферические оболочки из шестиугольных панелей [Текст] / В.Д. Антошкин, А.Г. Коновалов // Огарёв-Online. – 2015. - № 13 (54). – С. 6.
5. Антошкин, В.Д. Способ монтажа криволинейной конструкции [Текст] / В.Д. Антошкин, Г.В. Курбаков, В.С. Бочкин // Tredoevropsky Vestnik pro Vedu a Vyzkum. – 2015. Т. 83. – С. 1.
- 6 А.с. №1661316 СССР, МПК: E04B1/38. Стыковое соединение деревянных элементов / Антошкин В.Д., Курганский В.Г. ; патентообладатель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева; опубл. 09.11.1988.
7. Ежов, Е.Ф. Построение линии влияния в трехшарнирных арках [Текст] / Е.Ф. Ежов, Ю.В. Юркин, В.Д. Антошкин, В.Е. Ежов // «Современные технологии строительных материалов и конструкций». Мат-лы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика В.Г. Шухова. – Саранск, 2003. – С. 160-164.
8. Пат. 129534 Российская Федерация, МПК: 129534. Сборная сферическая оболочка / В.И. Травуш, В.Д. Антошкин, В.Т. Ерофеев; заявитель и патентообладатель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева- 2012143919/03; опубл. 27.07.2013.
9. Пат. 2520192 Российская Федерация, МПК: E04B1/32 Сборная сферическая оболочка / В.И. Травуш, В.Д. Антошкин, В.Т. Ерофеев; заявитель и патентообладатель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева; опубл. 06. 27.2013.
10. Пат. 2564545 Российская Федерация, МПК: E04B1/32. Сборная сферическая оболочка / В.И. Травуш, В.Д. Антошкин, И.В. Ерофеева, Д.В. Антошкин; заявитель и патентообладатель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева; опубл. 28.07.2014.
11. Травуш, В.И. Современные конструктивно-технологические решения сферических оболочек [Текст] / В.И. Травуш, В.Д. Антошкин, В.Т. Ерофеев, С.С. Гудожников // Строительство и реконструкция. –2012. - № 6 (44). – С. 45-55.
12. Травуш, В.И. Конструктивно-технологические возможности сборных сферических оболочек [Текст] / В.И. Травуш, В.Д. Антошкин, В.Т. Ерофеев, С.С. Гудожников // Строительство и реконструкция. – 2013. - № 6 (50). –С. 36-48.
13. Travush, V.I. The problem 7 forming triangular geometric line field / V.I. Travush, V.D. Antoshkin // MATEC Web of Conferences 86, 010 (2016) –DOI: 10.1051/mateconf/20168601032
14. Travush, V.I. The problem 4 of placement triangular geometric line field / V.I. Travush, V.D. Antoshkin //MATEC Web of Conferences 86, 010 (2016) – DOI: 10.1051/mateconf/20168601031.
15. Travush, V.I. To the problem 5 of emplacement of triangular geometric net on the sphere / V.I. Travush, V.D. Antoshkin // MATEC Web of Conferences 106, 02003 (2017) – DOI: 10.1051/mateconf./201710602012
16. Travush, V.I. To the problem 6 of emplacement of triangular geometric net on the sphere / V.I. Travush, V.D. Antoshkin // MATEC Web of Conferences 106, 02012 (2017) –DOI: 10.1051/mateconf/201710602012

**Антошкин Василий Дмитриевич**

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Россия, Республика Мордовия, г. Саранск

Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой зданий, сооружений и автомобильных дорог

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

---

V.D. ANTOSHKIN

## STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL FORMING OF SHELLS ON THE BASIS OF FLATS REGULAR HEXAGON AND TRIANGLE PANELS PLACED IN THE REPEATED SPHERE SECTORS

*The problems of constructive and technology forming of spherical shells based on radial - ring network was considered. Investigated from several different constructive-technological methods of formation of triangular networks on the sphere, which was named "Trainer". In each of them the optimality criterion is the minimum number of sizes of structural parts and a minimum number of Assembly elements of the dome, the possibility of pre-Assembly and pre-stress. Theoretical background placement of panels in the form of regular hexagons in composite spherical shells. It is determined that the shell surface has a positive Gaussian curvature for the given order of the panels and require specific structures, installation of nodes.*

**Keywords:** team spherical shell, constructive and technological forms, panel, a regular hexagon, spatial construction.

## BIBLIOGRAPHY

1. Antoshkin V.D. The problem optimization triangular geometric line field [Text] / V.D. Antoshkin, V.I. Travush, V.T. Erofeev, V.I. Rimshin, V.L. Kurbatov // Modern Applied Science. – 2015. - Т. 9. - № 3. – С. 46-50.
2. Antoshkin, V.D. Effektivnyye konstruktivno-tekhnologicheskiye resheniya sbornykh sfericheskikh kupo-lov [Tekst] / V.D. Antoshkin // Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo. – 2015. - № 3 (24). – С. 112-121.
3. Antoshkin, V.D. Perspektivnyye konstruktivno-tekhnologicheskiye resheniya sbornykh sfericheskikh obolochek [Tekst] / V.D. Antoshkin, S.S. Gudozhnikov, O.I. Perfil'yeva, I.V. Yerofeyeva // «Aktual'nyye voprosy arkhitektury i stroitel'stva». Materialy Trinadtsatoy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: v 2 chastyakh. – 2014. – С. 4-15.
4. Antoshkin, V.D. Sbornyye sfericheskiye obolochki iz shestiyugol'nykh paneley [Tekst] / V.D. Antoshkin, A.G. Kononov // Ogarov-Online. – 2015. - № 13 (54). – С. 6.
5. Antoshkin, V.D. Sposob montazha krivolineynoy konstruktсии [Tekst] / V.D. Antoshkin, G.V. Kurba-kov, V.S. Bochkin // Tredoevropsky Vestnik pro Vedu a Vyzkum. – 2015. Т. 83. – С. 1.
- 6 A.s. №1661316 SSSR, MPK: E04B1/38. Stykovoye soyedineniye derevyannykh elementov / Antoshkin V.D., Kur-ganskiy V.G. ; patentoobladatel' Natsional'nyy issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N.P. Ogareva; opubl. 09.11.1988.
7. Yezhov, Ye.F. Postroyeniye linii vliyaniya v trekhsharnirnykh arkakh [Tekst] / Ye.F. Yezhov, YU.V. Yurkin, V.D. Antoshkin, V.Ye. Yezhov // «Sovremennyye tekhnologii stroitel'nykh materialov i konstruktсии». Mat-ly Vseros-siyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya akademika V.G. Shukhova. – Saransk, 2003. – С. 160-164.
8. Pat. 129534 Rossiyskaya Federatsiya, MPK: 129534. Sbornaya sfericheskaya obolochka / V.I. Travush, V.D. Antoshkin, V.T. Yerofeyev; zayavitel' i patentoobladatel' Natsional'nyy issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N.P. Ogareva- 2012143919/03; opubl. 27.07.2013.
9. Pat. 2520192 Rossiyskaya Federatsiya, MPK: E04B1/32 Sbornaya sfericheskaya obolochka / V.I. Tra-vush, V.D. Antoshkin, V.T. Yerofeyev; zayavitel' i patentoobladatel' Natsional'nyy issledovatel'skiy Mor-dovskiy gosudarstvennyy univer-sitet im. N.P. Ogareva; opubl. 06. 27.2013.
10. Pat. 2564545 Rossiyskaya Federatsiya, MPK: E04B1/32. Sbornaya sfericheskaya obolochka / V.I. Tra-vush, V.D. Antoshkin, I.V. Yerofeyeva, D.V. Antoshkin; zayavitel' i patentoobladatel' Natsional'nyy issledo-vatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N.P. Ogareva; opubl. 28.07.2014.
11. Travush, V.I. Sovremennyye konstruktivno-tekhnologicheskiye resheniya sfericheskikh obolochek [Tekst] / V.I. Travush, V.D. Antoshkin, V.T. Yerofeyev, S.S. Gudozhnikov // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2012. - № 6 (44). – С. 45-55.
12. Travush, V.I. Konstruktivno-tekhnologicheskiye vozmozhnosti sbornykh sfericheskikh obolochek [Tekst] / V.I. Travush, V.D. Antoshkin, V.T. Yerofeyev, S.S. Gudozhnikov // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2013. - № 6 (50). – С. 36-48.
13. Travush, V.I. The problem 7 forming triangular geometric line field / V.I. Travush, V.D. Antoshkin // MATEC Web of Conferences 86, 010 (2016) –DOI: 10.1051/mateconf/20168601032
14. Travush, V.I. The problem 4 of placement triangular geometric line field / V.I. Travush, V.D. Antoshkin //MATEC Web of Conferences 86, 010 (2016) – DOI: 10.1051/mateconf/20168601031.
15. Travush, V.I. To the problem 5 of emplacement of triangular geometric net on the sphere / V.I. Travush, V.D. Antoshkin // MATEC Web of Conferences 106, 02003 (2017) – DOI: 10.1051/mateconf/201710602012
16. Travush, V.I. To the problem 6 of emplacement of triangular geometric net on the sphere / V.I. Travush, V.D. Antoshkin // MATEC Web of Conferences 106, 02012 (2017) –DOI: 10.1051/mateconf/201710602012

### V.D. Antoshkin

Mordovian State University, Russia, Saransk

Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head of buildings, structures and roads department

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



ГОЛИК В.И., РАЗОРЕНОВ Ю.И.

## МЕТОДЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ ПРИ КОМБИНИРОВАНИИ ГОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Детализированы аспекты применения методов строительной механики при решении задач комбинирования геотехнологий. Сформулирована концепция использования несущей способности технологически нарушенного дискретного породного массива. Установлены закономерности поведения породных массивов как реакции на техногенное вмешательство. Даны модели устойчивости свода естественного равновесия и устойчивость плоской кровли. Дана оценка перспектив доработки месторождений некондиционных руд альтернативного традиционным технологиям способа с выщелачиванием руд. Исследованы условия эффективности комбинирования традиционных технологий с гидрометаллургическими технологиями добычи металлов.*

**Ключевые слова:** *строительная механика, подземная разработка, порода, массив, геомеханика, металл, выщелачивание.*

Горное производство играет важную роль в истории народов. Объектами эксплуатации первобытного человека ранее других стали месторождения окисленных руд и самородной меди, свойства которой позволяли обрабатывать их оббивкой. Размеры древних карьеров достигали 45 х 30 х 3 м.

Несколько позже человек научился выплавлять металл из медных руд.

Для Российских регионов горной добычи характерно наличие древних объектов разработки месторождений полезных ископаемых, которые могут представлять интерес для возобновления добычных работ.

Реформы 90-х годов радикально изменили стратегию добычи и переработки минерального сырья. Действующие металлургические комплексы испытывают дефицит в рудах, что определяет необходимость развития местной сырьевой базы [1-4].

Резервом увеличения производства металлов является освоение глубокозалегающих участков эксплуатируемых месторождений, что достигается конверсией с открытого способа разработки на подземный способ.

Подземный способ разработки месторождений осуществляется использованием камерных систем разработки с твердеющей закладкой. Большая часть запасов добывается в тяжелых горно-геологических условиях на глубине до 1200 м.

Устойчивое развитие горно-металлургических предприятий и обеспечение минерально-сырьевой безопасности России может быть достигнуто путем развития местной сырьевой базы, в том числе потерянных и считающихся недоступными запасов. Такое же положение характерно и для других регионов горной добычи.

С развитием научно-технической революции многие страны мира испытывают трудности с обеспечением промышленности металлами. Промышленные запасы руд многих месторождений уменьшаются, а качество руд снижается, увеличивая себестоимость конечного продукта. Это стимулирует выборочную отработку участков месторождений, что еще больше увеличивает потери руд и металлов при добыче.

При подземной добыче руд цветных металлов преобладает валовая отбойка без разделения на сорта. Системы разработки с обрушением характеризуются повышенными потерями и разубоживанием руды, поэтому большая часть месторождений разрабатывают системами разработки с закладкой выработанного пространства. Для месторождений жильного типа увеличение глубины горных работ (1000—1500 м и более) сопровождается активизацией динамических явлений.

В пределах эксплуатируемых месторождений появляются участки, где использование традиционных технологий экономически неприемлемо. Стремление максимально использовать балансовые и забалансовые запасы руды обусловило развитие направления комбинированной разработки месторождений [5-8].

Важным объектом комбинирования технологий добычи металлов является подземное выщелачивание руд в эксплуатационных блоках. Особенность ситуации заключается в том, что металлические руды – комплексные и использование хвостов их переработки без извлечения из них оставшихся металлов и экономически и экологически некорректно. Многие металлы: золото, уран, медь, цинк и др. относятся к легко-вскрываемым, что увеличивает возможности выщелачивания.

Природоохранные тенденции добычи руд породили класс технологий с закладкой выработанного пространства, в том числе, монолитной твердеющей закладкой. При неоспоримых достоинствах, прежде всего, полнота и высокое качество добываемых руд, технологии с закладкой требуют выдачи на поверхность и руды, и разубоживающих пород [9-12].

Этот недостаток в большей части исправляет использование технологий с выщелачиванием металлов, при использовании которых механизм образования потерь и разубоживания руд, а также управление геомеханикой массива изменяется (рис.1).

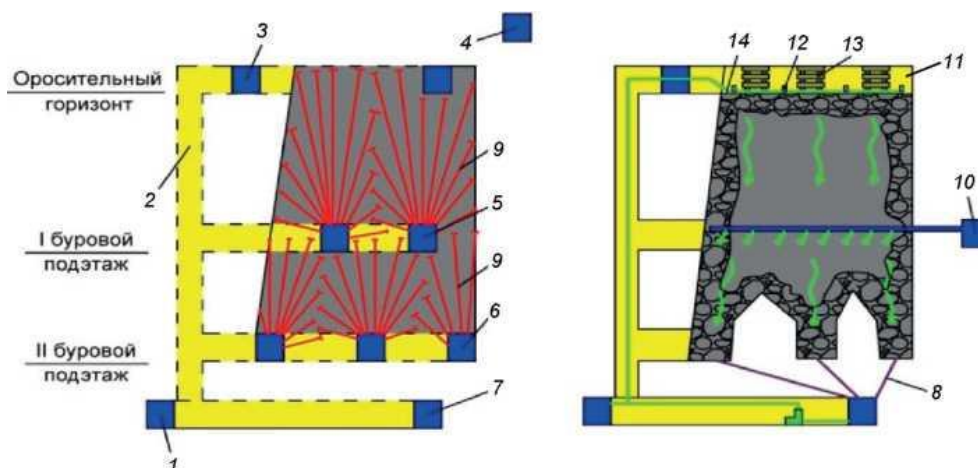


Рисунок 1 – Подземное блоковое выщелачивание металлов: 1 - штрек; 2 - восстающий; 3 - штрек для орошения; 4 - штрек; 5 - буровые штреки; 6 - дренажно-буровые штреки; 7 - дренажный штрек; 8 - дренажные скважины; 9 - промежуточный горизонт орошения; 10 - промежуточный горизонт орошения; 11 - штрек для орошения; 12 - верхняя подсечка; 13 - костровая крепь; 14 - оросительная система.

В горнодобывающих регионах многие эксплуатируемые месторождения могут подлежать повторной разработке, так как сложены уже отделенной от массива и раздробленной доступной для выщелачивания горной массой. Условием применения таких технологий обеспечение размеров реагирующих частиц и связанная с ней фильтрационная способность руд, что обеспечивается в рамках комбинирования геотехнологий.

Исследования перспектив доработки месторождений некондиционных руд начались полвека назад как альтернатива традиционным технологиям, использование которых опасно для окружающей среды химическим загрязнением при развитии природного выщелачивания потерянных руд [13-16].

Подземное выщелачивание урановых руд осуществлено на Казахстанском месторождении Восток отработкой рудного тела в трещиноватых породах крепостью 4-6 по М.М. Протодаконову в блоке размерами 30×5×30 м. При коэффициенте разрыхления руд 1,12 коэффициент извлечения металлов в раствор составил 72%.

Кучное выщелачивание металлов получило распространение на месторождениях руд цветных металлов, как возможность утилизации хвостов первичной переработки с извлечением до 50 – 70 % металлов от исходного значения.

При комбинировании технологий богатые руды выдают на поверхность и перерабатывают на заводе, а бедные выщелачивают в подземных блоках и штабелях с получением металлов, строительного сырья, обессоленной воды, газов, кислот и щелочей.

Принципы природоохранности включают в себя:

- снижение разубоживания руд породами при управлении массивом путем закладки пустот твердеющими смесями;
- создание искусственных несущих массивов при выщелачивании убогих и бедных руд;
- извлечение всех ценных компонентов гидрометаллургической переработкой.

Утилизация хвостов обогащения становится возможной после извлечения из них металлов до определенного уровня путем воздействия на минеральное сырье высокой энергией в активаторах.

Перспективы закладочных технологий связаны с использованием хвостов обогащения после извлечения из них металлов и хвостов подземного выщелачивания бедных руд, которые по окончании извлечения металлов естественными вяжущими веществами скрепляются в массив с прочностью (0,5 - 1 МПа).

Параметры формирующихся в массиве посредством консолидации разуплотненных и уплотненных пород конструкций оптимизируют с использованием методов механики дискретных сред [17-20].

Начало применения методов строительной механики при решении горно - геомеханических задач положено А.Н. Динником.

Гипотезы свода обрушения на основе оценки массы пород в пределах свода обрушения разработаны в трудах М.М. Протодяконова, П.М. Цимбаревича, Г.М. Малахова, В.Д. Слесарева и др.

В развитие работ предшественников В.Д. Слесарев показал, что трещины разбивают плоское обнажение на отдельные защемленные блоки, которые образуют шарнирные конструкции со смыканием трещин в верхней части блоков и размыканием в нижней части, а нижний слой пород кровли работает как защемленная в опорах и нагруженная породами в пределах свода балка.

Современные методы управления породными конструкциями основаны на учете механизма горного давления и создаваемых им напряжений и используют методы строительной механики на основе теории упругости, пластичности, ползучести и др.

Основу управления состоянием массивов методами строительной механики составляют положения:

- несущая способность конструкций зависит от геомеханической сбалансированности пород;
- несущая способность пород повышается путем регулирования деформаций;
- управление массивами обеспечивается повышением прочности несущих породных конструкций.

Породы кровли выработок разбиты на структурные блоки, которые в кровле очистных выработок могут образовывать трехшарнирную арку, устойчивость которой определяется физико-механическими свойствами, размерами структурных блоков и элементами залегания рудных тел (рис.2).

Устойчивость кровли выработок определяется величиной их эквивалентных пролетов, а критерием устойчивости является условие:

$$L_{\text{факт}} \leq L_{\alpha}^o$$

где  $L_{\alpha}^o$  - предельно допустимый эквивалентный пролет обнажения плоской кровли, определенный для данных условий, м;

$L_{факт}$  - эквивалентный пролет кровли фактической выработки, м.

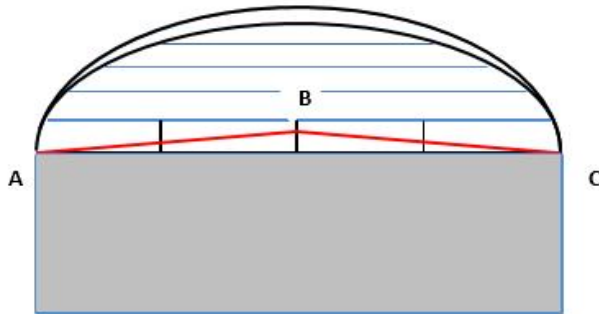


Рисунок 2 – Схема сохранения плоской кровли при возникновении шарнирной арки: A, B, C – шарниры

Если рудное тело по условиям устойчивости кровли невозможно отработать одним забоем, то оно делится на отдельные участки, размеры каждого из которых удовлетворяют условию безопасности.

Расчет предельно допустимого эквивалентного пролета пород кровли выработки на геомеханической основе предполагает, что разбитые геологическими нарушениями породы основной кровли, образуют над выработкой шарнирную арку. Кровля обрушается, но над выработкой образуется свод естественного равновесия, дальше которого обрушение пород

не распространяется. Свод естественного равновесия несет массу вышележащих пород.

Решая систему уравнений, описывающих устойчивость свода естественного равновесия и устойчивость плоской кровли, нагруженной весом пород под сводом естественного равновесия, определяют предельно допустимые параметры пролетов плоской кровли.

Пролет бесконечной длины выработки, высота свода естественного равновесия над ней и инженерно-геологические характеристики массива связаны между собой:

$$\left( \frac{2 R_{сж} k_o d_1 h_{св}}{\gamma g (2 H - h_{св})} \right)^2 = h_{св}^2 \left( \frac{l}{2} \right)^2 + \left( \frac{l}{2} \right)^4$$

где  $d_1$  - размер структурного блока в горизонтальном направлении, м;  $R_{сж}$  - прочность горных пород на сжатие, Па;  $k_o$  - коэффициент структурного ослабления пород;  $h_{св}$  - высота свода естественного равновесия, м;  $\gamma$  - плотность горных пород, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  - ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с<sup>2</sup>;  $H$  - глубина залегания выработки, м;  $l$  - пролет выработки бесконечной длины, м.

Связь между максимальным пролетом плоской кровли, высотой соответствующего этой выработке свода естественного равновесия и свойствами пород имеет вид:

$$\left( \frac{3 R_{сж} k_o d_2^2}{2 k_3 \gamma h_{св} g} \right)^2 = d_2^2 \left( \frac{L^o}{2} \right)^2 + \left( \frac{L^o}{2} \right)^4$$

где  $R_{сж}$  - прочность горных пород на сжатие, Па;  $k_o$  - коэффициент структурного ослабления пород;  $d_2^2$  - вертикальный размер структурного блока, м;  $\gamma$  - плотность горных пород, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  - ускорение свободного падения, равное 9,81 м/сек<sup>2</sup>;  $h_{св}$  - высота свода естественного равновесия, м;  $L^o$  - предельно допустимый пролет плоской кровли выработки бесконечной длины.

Величина предельно допустимого пролета плоской кровли выработки бесконечной длины:

$$\left\{ \begin{aligned} \left( \frac{2 R_{c \text{ ж}} k_o d_1 h_{c \text{ в}}}{\gamma g (2 H - h_{c \text{ в}})} \right)^2 &= h_{c \text{ в}}^2 \left( \frac{l}{2} \right)^2 + \left( \frac{l}{2} \right)^4 \\ \left( \frac{3 R_{c \text{ ж}} k_o d_2^2}{2 k_3 \gamma h_{c \text{ в}} g} \right)^2 &= d_2^2 \left( \frac{L^o}{2} \right)^2 + \left( \frac{L^o}{2} \right)^4 \end{aligned} \right.$$

По рассчитанной величине предельно допустимого эквивалентного пролета обнажения плоской кровли определяются параметры эквивалентной ей по устойчивости плоской кровли выработки прямоугольной формы. Задаваясь одним из размеров блока, определяют другой размер. Такой подход согласуется с принятыми методиками строительной механики [21, 22].

Комбинирование технологии целесообразно экономически, когда 40% богатой руды выдается на поверхность, а 60% руды выщелачивается под землей. При сохранении производительности предприятия по горной массе производительность по металлу увеличивается в 2 раза. Извлечение металлов выщелачиванием может применяться на всех этапах разработки месторождения (рис.3).

Максимальная экономическая эффективность отработки обеспечивается при условии:

$$M' \geq \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_T}{\varepsilon_n - \varepsilon_2 \varepsilon_3} M$$

где  $M$  - количество металлов в недрах, ед.;

$M'$  - количество выданного из недр металла, ед.;

$\varepsilon_n$  - извлечение металлов из руд выщелачиванием, доли ед.;

$\varepsilon_T$  - извлечение металлов из недр при традиционной технологии:

$$\varepsilon_T = \frac{M_B}{M} \cdot \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3,$$

где  $M_B$  - количество металлов при традиционной технологии, ед.;

$\varepsilon_1$  - извлечение металлов из недр при традиционной технологии, доли ед.;

$\varepsilon_2$  - извлечение металлов в концентрат при обогащении, доли ед.;

$\varepsilon_3$  - извлечение полезного компонента из концентрата на ГМЗ, доли ед.;

Комбинирование процессов механической активации и химического выщелачивания позволяет извлекать металлы на 2 порядка быстрее, чем при агитационном выщелачивании, что обеспечивает экономическую эффективность технологии. Выщелачивания в дезинтеграторах используют для повышения активности компонентов смеси при приготовлении твердеющих смесей (рис.4).

Активированные хвосты обогащения используются в составе твердеющей смеси и в качестве инертных заполнителей, и качестве вяжущих компонентов, обеспечивая прочность 0,5 - 1,5 МПа, достаточную для закладки большинства выработанного пространства.

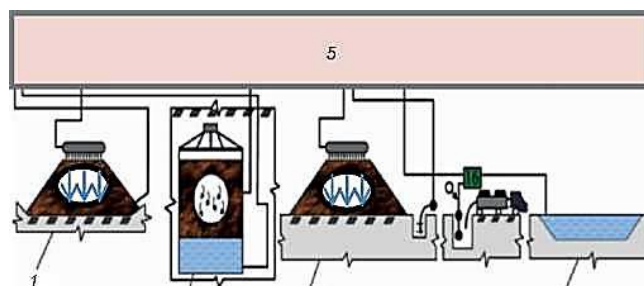


Рисунок 3 – Комбинированное выщелачивание металлов: 1 - штабель КВ; 2 - блок ПВ; 3 - отвал; 4 - пруд; 5 - цех переработки растворов

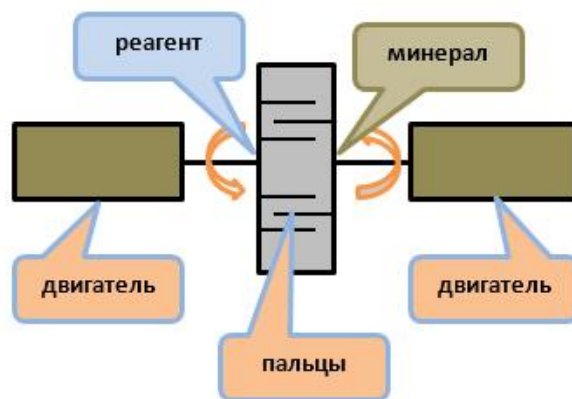


Рисунок 4 - Схема выщелачивания в дезинтеграторе



Защищенные породными перекрытиями участки месторождений могут быть погашены или изоляцией или твердеющими смесями меньшей прочности, например, на основе хвостов подземного выщелачивания или хвостов обогащения руд после извлечения из них полезных компонентов, что позволяет сократить расходы предприятия

Эффективность комбинирования геотехнологий должна оцениваться не по прибыли как разницы между стоимостью металлов на рынке  $C_o$  и затратами на его производство  $З_o$ , а с уменьшением на величину стоимости потерянных в недрах металлов:

$$\Pi = C_o - З_o - C_n.$$

Такой подход поставит применяемые технологии в сравнимые условия и будет способствовать гуманизации отношения к невосполнимым запасам недр.

### Заключение

Комбинирование традиционных технологий разработки с технологиями выщелачивания металлов на геомеханической основе открывает перспективы использования ранее считавшихся некондиционными запасов и является резервом оздоровления экономики горных предприятий.

Создание безопасных условий разработки месторождений возможно при установлении допустимого соотношения между техногенными напряжениями и деформациями массива на основе методов строительной механики дискретных сред.

Утилизация хвостов обогащения на основе технологий выщелачивания обеспечит возможности погашения образованных горными работами пустот закладкой твердеющими смесями, что важно при работе на больших глубинах в напряженных скальных массивах.

Вовлекаемые в производство некондиционные запасы формируют практически неограниченную сырьевую базу.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каплунов, Д.Р. Развитие теории проектирования и реализация идей комплексного освоения недр [Текст] / Д.Р. Каплунов, М.В. Рыльникова // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008. - № 4. - С. 20-41.
2. Ляшенко, В.И. Природоохранные технологии освоения сложноструктурных месторождений полезных ископаемых [Текст] / В.И. Ляшенко // ФГУП «ГИПРОЦВЕТМЕТ». Маркшейдерский вестник. - 2015. - № 1. - С. 10-15.
3. Golik V.I. The provision of development conversion perspectives into underground one for russian iron ore deposits development / V.I. Golik, O.Z. Gabaraev, S.A. Maslennikov, Z.M. Khasheva, L.P. Shulgaty // Journal of the Social Sciences. - 2016. - Т. 11. - № 18. - С. 4348—4351.
4. Голик, В.И. Принципы и экономическая эффективность комбинирования технологий добычи руд [Текст] / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, С.Г. Страданченко, З.М. Хашева // Известия Томского политехнического университета. - Инжиниринг георесурсов. - 2015. - Т. 326. - № 7. - С. 6—14.
5. Голик, В.И. Концепция комбинирования технологий разработки рудных месторождений [Текст] / В.И. Голик, В.И. Комашенко, Н.М. Качурин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. - 2015. - № 4. - С. 76—88.
6. Ляшенко, В.И. Комбинированные технологии добычи полезных ископаемых с подземным выщелачиванием [Текст] / В.И. Ляшенко, В.И. Голик, Е.Н. Козырев // Горный журнал. - 2008. - № 12. - С. 37—40.
7. Polukhin, O.N. Substantiating the possibility and expediency of the ore beneficiation tailings usage in solidifying mixtures production / O.N. Polukhin, V.I. Komashchenko, V.I. Golik, C. Drebenstedt // Scientific Reports on Resource Issues Innovations in Mineral Resource Value Chains: Geology, Mining, Processing, Economics, Safety, and Environmental Management. - Freiberg, 2014. - pp. 402-412.
8. Golik, V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - Т. 7. - № 3. - pp. 49-52.
9. Голик, В.И. Современные технологии извлечения металлов из хвостов обогащения и переработки руд с целью их комплексного использования [Текст] / В.И. Голик, В.И. Комашенко, А.В. Поляков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. - 2016. - № 1. - С. 100—111.
10. Голик, В.И. Проектирование горных предприятий [Текст] / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов. - Новочеркасск, 2007. - 262 с.
11. Голик, В.И. Технологии освоения месторождений урановых руд [Текст] / В.И. Голик. - М.: Российский гос. геологоразведочный ун-т им. Серго Орджоникидзе, 2007. - 131 с.
12. Golik, V. The effectiveness of combining the stages of ore fields development / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, Z. Khasheva // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - Т. 7. - № 5. - pp. 401-405.

13. Golik, V.I. Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste / V.I. Golik, Z.M. Khasheva, L.P. Shulgatyi // The Social Sciences. - 2015. - Т. 10. - № 6. pp. 750-754.
14. Голик В.И. Практика выщелачивания металлов из отходов переработки руд [Текст] / В.И. Голик, В.И. Комащенко // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. - 2016. - № 3. С. - 13—23.
15. Голик, В.И. Эффективность выщелачивания некондиционных руд в штабеле [Текст] / В.И. Голик, В.В. Вернигор // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. - 2017. - № 1 - С. 68—82.
16. Голик, В.И. Экспериментальное обоснование параметров подземного выщелачивания металлов [Текст] / В.И. Голик, В.Г. Лукьянов, С.Г. Страданченко, С.А. Масленников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. -2015-Т. 326. - № 11. - С. 90—97.
17. Голик, В.И. Искусственные потолочины при подземной добыче руд как альтернатива рудным целикам [Текст] / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, В.Г. Лукьянов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. -2016. -Т. 327. - № 3- С. 87—94.
18. Голик, В.И. Оптимизация прочности закладочной смеси с учетом напряженности пород [Текст] / В.И. Голик, В.Г. Лукьянов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. -2016. -Т. 327- № 6. -С. 6—14.
19. Голик, В.И. Концептуальные подходы к созданию мало и безотходного горнорудного производства на основе комбинирования физико-технических и физико-химических геотехнологий [Текст] / В.И. Голик // Горный журнал. - 2013. - № 5. -С. 93—97.
20. Голик, В.И. Принципы и экономическая эффективность комбинирования технологий добычи руд [Текст] / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, С.Г. Страданченко, З.М. Хашева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2015. - Т. 326. -№ 7. -С. 6—14.
21. Голик, В.И. Прочность породных конструкций при подземном строительстве [Текст] / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, В.И. Ляшенко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2017. - № 4. - С. 57—65.
22. Голик, В.И. Несущие породные конструкции при освоении подземных объектов [Текст] / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, В.И. Ляшенко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2017. - № 2. - С. 48—57.

**Голик Владимир Иванович**

ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», г. Владикавказ

Доктор технических наук, профессор кафедры горного дела

E-mail: [v.i.golik@mail.ru](mailto:v.i.golik@mail.ru)

**Разоренов Юрий Иванович**

ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», г. Владикавказ

Доктор технических наук, профессор

E-mail: [info@skgmi-gtu.ru](mailto:info@skgmi-gtu.ru)

---

V.I. GOLIK, Yu.I. RAZORENOV

**METHODS OF STRUCTURAL MECHANICS WHEN COMBINING MINING TECHNOLOGIES**

*Detailed aspects of application of methods of structural mechanics at the decision of tasks of combined Geotechnology. Formulated the concept of capacity utilization of technologically disturbed discrete rock mass. The regularities of the behavior of rock masses as a response to anthropogenic intervention. This model, the stability of the arch natural equilibrium and stability of a flat roof. The estimation of prospects of improvements of substandard ore deposits alternative to traditional technologies method with the leaching of ores. The conditions for the effectiveness of combining traditional techniques with hydrometallurgical technologies for the extraction of metals.*

**Keywords:** structural mechanics, underground mining, rock, solid, geomechanics, metal leaching.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Kaplunov, D.R. Razvitiye teorii proyektirovaniya i realizatsiya idey kompleksnogo osvoyeniya nedr [Tekst] / D.R. Kaplunov, M.V. Ryl'nikova // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. - 2008. - № 4. - S. 20-41.
2. Lyashenko, V.I. Prirodokhrannyye tekhnologii osvoyeniya slozhnostrukturnykh mestorozhdeniy poleznykh iskopyemykh [Tekst] / V.I. Lyashenko // FGUP «GIPROTSVETMET». Marksheyderskiy vestnik. - 2015. - № 1- С.10-15.

3. Golik V.I. The provision of development conversion perspectives into underground one for russian iron ore deposits development / V.I. Golik, O.Z. Gabaraev, S.A. Maslennikov, Z.M. Khasheva, L.P. Shulgaty // Journal of the Social Sciences. – 2016. – Т. 11. – № 18. – С. 4348–4351.
4. Golik, V.I. Printsipy i ekonomicheskaya effektivnost' kombinirovaniya tekhnologiy dobychi rud [Tekst] / V.I. Golik, YU.I. Razorenov, S.G. Stradanchenko, Z.M. Khasheva // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – Inzhiniring georesurov. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 6–14.
5. Golik, V.I. Kontsepsiya kombinirovaniya tekhnologiy razrabotki rudnykh mestorozhdeniy [Tekst] / V.I. Golik, V.I. Komashchenko, N.M. Kachurin // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle. – 2015. – № 4. – С. 76–88.
6. Lyashenko, V.I. Kombinirovannyye tekhnologii dobychi poleznykh iskopayemykh s podzemnym vyshchelachivaniyem [Tekst] / V.I. Lyashenko, V.I. Golik, Ye.N. Kozyrev // Gornyy zhurnal. – 2008. – № 12. – С. 37–40.
7. Polukhin, O.N. Substantiating the possibility and expediency of the ore beneficiation tailings usage in solidifying mixtures production / O.N. Polukhin, V.I. Komashchenko, V.I. Golik, C. Drebenstedt // Scientific Reports on Resource Issues Innovations in Mineral Resource Value Chains: Geology, Mining, Processing, Economics, Safety, and Environmental Management. - Freiberg, 2014. - pp. 402-412.
8. Golik, V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - Т. 7. - № 3. - pp. 49-52.
9. Golik, V.I. Sovremennyye tekhnologii izvlecheniya metallov iz khvostov obogashcheniya i pererabotki rud s tsel'yu ikh kompleksnogo ispol'zovaniya [Tekst] / V.I. Golik, V.I. Komashchenko, A.V. Polyakov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle. – 2016. – № 1. – С. 100–111.
10. Golik, V.I. Proyektirovaniye gornyykh predpriyatiy [Tekst] / V.I. Golik, YU.I. Razorenov. - Novocherkassk, 2007. - 262 s.
11. Golik, V.I. Tekhnologii osvoyeniya mestorozhdeniy uranovykh rud [Tekst] / V.I. Golik. – М.: Rossiyskiy gos. geologorazvedochnyy un-t im. Sergo Ordzhonikidze, 2007. – 131 с.
12. Golik, V. The effectiveness of combining the stages of ore fields development / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, Z. Khasheva // Metallurgical and Mining Industry. - 2015. - Т. 7. - № 5. - pp. 401-405.
13. Golik, V.I. Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste / V.I. Golik, Z.M. Khasheva, L.P. Shulgaty // The Social Sciences. - 2015. - Т. 10. - № 6. pp. 750-754.
14. Golik V.I. Praktika vyshchelachivaniya metallov iz otkhodov pererabotki rud [Tekst] / V.I. Golik, V.I. Komashchenko // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle. – 2016. – № 3. С. – 13–23.
15. Golik, V.I. Effektivnost' vyshchelachivaniya nekonditsionnykh rud v shtabele [Tekst] / V.I. Golik, V.V. Vernigor // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle. – 2017. – № 1 – С. 68–82.
16. Golik, V.I. Eksperimental'noye obosnovaniye parametrov podzemnogo vyshchelachivaniya metallov [Tekst] / V.I. Golik, V.G. Luk'yanov, S.G. Stradanchenko, S.A. Maslennikov // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. – 2015–Т. 326. – № 11. – С. 90–97.
17. Golik, V.I. Iskusstvennyye potolochiny pri podzemnoy dobyche rud kak al'ternativa rudnym tselikam [Tekst] / V.I. Golik, YU.I. Razorenov, V.G. Luk'yanov // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. – 2016. – Т. 327. – № 3 – С. 87–94.
18. Golik, V.I. Optimizatsiya prochnosti zakladochnoy smesi s uchetom napryazhennosti porod [Tekst] / V.I. Golik, V.G. Luk'yanov // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. – 2016. – Т. 327– № 6. – С. 6–14.
19. Golik, V.I. Kontseptual'nyye podkhody k sozdaniyu malo i bezotkhodnogo gornorudnogo proizvodstva na osnove kombinirovaniya fiziko-tekhnicheskikh i fiziko-khimicheskikh geotekhnologiy [Tekst] / V.I. Golik // Gornyy zhurnal. – 2013. – № 5. – С. 93–97.
20. Golik, V.I. Printsipy i ekonomicheskaya effektivnost' kombinirovaniya tekhnologiy dobychi rud [Tekst] / V.I. Golik, YU.I. Razorenov, S.G. Stradanchenko, Z.M. Khasheva // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 6–14.
21. Golik, V.I. Prochnost' porodnykh konstruktsey pri podzemnom stroitel'stve [Tekst] / V.I. Golik, YU.I. Razorenov, V.I. Lyashenko // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsey i sooruzheniy. – 2017. - № 4. – С. 57–65.
22. Golik, V.I. Nesushchiye porodnyye konstruktсии pri osvoyenii podzemnykh ob'yektov [Tekst] / V.I. Golik, YU.I. Razorenov, V.I. Lyashenko // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsey i sooruzheniy. – 2017. - № 2. – С. 48–57.

#### **V. I. Golik**

North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz  
 Doctor of technical Sciences, Professor of the Mining Department  
 E-mail: [v.i.golik@mail.ru](mailto:v.i.golik@mail.ru)

#### **Yu. I. Razorenov**

North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz  
 Doctor of technical Sciences, Professor  
 E-mail: [info@skgmi-gtu.ru](mailto:info@skgmi-gtu.ru)

ДЕМЬЯНОВ А.И., САЛЬНИКОВ А.С., КОЛЧУНОВ Вл.И.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ И АНАЛИЗ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

*Предложена программа и методика экспериментальных исследований железобетонных конструкций при кручении с изгибом, основной целью которой является проверка расчетных предпосылок и экспериментального определения расчетных параметров предлагаемой методики расчета.*

*Проведены экспериментальные исследования с целью проверки предлагаемого расчетного аппарата и выявления закономерностей и параметров трещинообразования, развития и раскрытия трещин, а также критериев разрушения железобетонных конструкций при кручении с изгибом. Важнейшими из них являются: обобщенные нагрузки  $R_{sup,cr}$ ,  $R_{sup,ly}$ , координаты образования пространственных трещин, ширина раскрытия пространственных трещин на уровне оси продольной и поперечной растянутой арматуры вдоль всего профиля трещин; изменения расстояния между трещинами  $l_{cr}$  и длины трещин  $h_{cr}$  по мере увеличения гравитационной нагрузки (с проверкой многоуровневого процесса образования трещин); деформаций сжатого бетона и арматуры при сложном напряженно-деформированном состоянии и др. Для анализа в статье приведены графики деформаций, в том числе, полученных по показаниям электротензометрических розеток.*

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования, железобетонные конструкции, трещинообразование, кручение с изгибом, анализ деформаций.

**Постановка проблемы.** Практическое использование железобетонных конструкций во все более сложных и ответственных зданиях и сооружениях сегодня вызывает настоятельную необходимость развития теории и совершенствования методов расчета железобетонных конструкций.

В любом конструктивном элементе, работающем на изгиб, возникает кручение за счет случайного эксцентриситета, обусловленного асимметрией сечения, неоднородностью материалов или внецентренным приложением вертикальной нагрузки. Существует целый класс конструкций (краевые балки, балки с боковыми консолями, наклонные арки, Г-образные рамы при действии ветровой нагрузки, опоры ЛЭП при одностороннем обрыве проводов и т.п.), в которых неучет кручения в расчетах может привести к обрушению отдельных конструкций, а в некоторых случаях и всего здания. Обследованиями, проведенными в США, Канаде и др. странах ассоциацией портландцемента, выявлено целый ряд случаев аварий, связанных с кручением.

Кручение представляет в железобетоне явление весьма сложное, для описания которого требуется привлечение ряда гипотез, подтвержденных экспериментом. Проблема изгиба с кручением в недалеком прошлом была малоизученной, так как проведение экспериментальных исследований пространственных фрагментов зданий требовало значительных экономических затрат.

**Анализ достижений и публикаций.** Сопротивление трещинообразованию различных пространственных трещин [1–4] в железобетонных конструкциях само по себе явление достаточно сложное, которое в условиях кручения с изгибом, еще более усложняется.

Экспериментальные исследования трещиностойкости железобетонных конструкций при кручении с изгибом проведены лишь в отдельных случаях с ограниченным количеством изучаемых параметров [5–7]. На сегодняшний день практически отсутствуют фактические данные о напряженно-деформированном состоянии и координатах появления пространственных трещин, не изучены возникающие при этом эффекты, связанные с нарушением сплошности железобетона. Мало опытных данных о длине и приращении трещин при увеличении

нагрузки. Тем не менее, отмеченные параметры являются определяющими для анализа сопротивления областей, прилегающим к местам пересечения трещинами рабочей арматуры, где, как показали последние исследования [7, 8 и др.], возникает эффект нарушения сплошности (деформационный эффект). Влияние такого эффекта на равновесие усилий в поперечном сечении по результатам исследований проф. В.М. Бондаренко, Вл. И. Колчунова [7], может составлять около 40%. Это становится особенно актуальным, когда речь идет о таком дифференциальном параметре, как ширина раскрытия трещин.

В работах [3–6] была сделана попытка разработки расчетных положений для решения задачи образования разных пространственных трещин на нижней и боковой грани железобетонных конструкций при кручении с изгибом, позволяющее отыскивать минимальное обобщенную загрузку и координаты точки образования первой пространственной трещины.

Разработанная методика [9] и проведенные экспериментальные исследования позволяют заметно уточнить зависимости для определения основных параметров трещиностойкости железобетонных конструкций, в частности, – обобщенной нагрузки образования различных пространственных трещин  $R_{sup,crc}$ , координат их образования и разрушающей нагрузки  $R_{sup,u}$ . С другой стороны, полученная экспериментальная информация, может дать более полное представление об особенностях сопротивления железобетона в целом.

**Исследовательская часть. Цель и задачи эксперимента.** Экспериментальные исследования проводятся *с целью* проверки предлагаемой расчетной модели, положенных в ее основу рабочих предпосылок и выявления закономерностей трещинообразования железобетонных конструкций при их сопротивлении кручению с изгибом. При этом экспериментальное определение основных параметров, с учетом эффекта нарушения сплошности и его анализа на различных стадиях нагружения, будет способствовать эффективному проектированию железобетонных конструкций.

В процессе экспериментальных исследований решались следующие **задачи**:

- разработка методики экспериментальных исследований трещиностойкости железобетонных конструкций по пространственным сечениям;
- проверка предлагаемого расчетного аппарата по уточненному расчету трещиностойкости железобетонных конструкций по пространственным сечениям с учетом эффекта нарушения сплошности;
- изучение закономерностей напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций;
- экспериментальное определение следующих параметров: значение опорной реакции  $R_{sup,crc}$  в момент образования различных пространственных трещин; координат  $x$  и  $y$  их образования, – расстояние по горизонтали  $x$  и по вертикали  $y$  от опорной реакции и от геометрической оси, соответственно; фактической высоты сжатой зоны  $x_{fact}$  и высоты сжатого бетона над наклонной трещиной  $x_B$  в сечении I–I (поперечное сечение, проходящее в конце пространственной трещины); прогибов; ширины раскрытия трещин на уровне оси продольной и поперечной растянутой арматуры вдоль всего профиля пространственных трещин; изменения расстояния между трещинами  $l_{crc}$  и длины трещин  $h_{crc}$  по мере увеличения нагрузки (с проверкой многоуровневого процесса образования трещин); деформаций сжатого бетона и средних деформаций арматуры в расчетных сечениях.

Конструкции опытных образцов. Программа исследований включала лабораторные испытания трех серий железобетонных конструкций. Объем и основные параметры экспериментальных конструкций приведены в таблице 1 на рис. 1. Количество испытываемых конструкций принято с учетом варьирования длины образца, класса основного бетона и плеча приложения нагрузки (от половины ширины образца до точки приложения силы траверсы). Для доведения до разрушения второй части опытной конструкции, использовались специальные стяжки, состоящие из шпилек и металлических пластин. Механические характеристики арматуры определялись в соответствии с действующими стандартами. При этом было испытано по пять стержней длиной 400 мм каждого диаметра (Ø6A240C, Ø10A400C, Ø16A400C).



Таблица 1 –Сери, объем и характеристики основных экспериментальных конструкций\*

№ се- рии	Шифр конструкции	Кол-во испыт.	$h$ , мм	$b$ , мм	$l$ , мм	Плечо приложе- ния нагрузки (от половины образ- ца до точки при- ложения силы травер- сы), мм	Арматура рас- тянутой зоны, диаметр – мм, класс	Арматура сжатой зоны, диаметр – мм, класс	Класс бетона основ- ного об- раз-ца
1	2	3	4	5	6	7	8	9	11
I	КИП –I–2,0	2	250	100	2000	350	2Ø10A400C	2Ø10A400C	B20
	КИП –I–2,0	2	250	100	2000	350	2Ø10A400C	2Ø10A400C	B20
	КИП –I–2,0	2	250	100	2000	350	2Ø10A400C	2Ø10A400C	B20
	КИП –I–2,0	2	250	100	2000	350	2Ø10A400C	2Ø10A400C	B20
II	КИП –II–1,6	2	250	100	1600	320	2Ø10A400C	2Ø10A400C	B20
	КИП –II–1,6	2	250	100	1600	320	2Ø10A400C	2Ø10A400C	B20
	КИП –II–1,6	2	250	100	1600	320	2Ø10A400C	2Ø10A400C	B20
	КИП –II–1,6	2	250	100	1600	320	2Ø10A400C	2Ø10A400C	B20
III	КИП –III–1,2	2	250	100	1200	290	2Ø10A400C	2Ø10A400C	B20
	КИП –III–1,2	2	250	100	1200	290	2Ø10A400C	2Ø10A400C	B20
	КИП –III–1,2	2	250	100	1200	290	2Ø10A400C	2Ø10A400C	B20
	КИП –III–1,2	2	250	100	1200	290	2Ø10A400C	2Ø10A400C	B20

\*Примечание. Шифр конструкции включает: К – кручение, И – изгиб, П – прямоугольное поперечное сечение, номер серии, 0,8; 1,2; 1,6 – длина конструкции. Арматура поперечных хомутов Ø6A240C раскатывается из бухты вручную, а не с помощью валков (чтобы не произошло вытяжки на площадке текучести).

Фактическая физическая (условная) граница текучести для арматурных стержней составила: гладкой арматуры A240CØ6мм – 256,47МПа, гладкой арматуры A240CØ10мм – 256,2 МПа, арматурных стержней периодического профиля A400CØ10мм – 425,5 МПа, A400CØ16мм – 427,8 МПа.

Изготовление балок осуществлялось в лаборатории строительных конструкций кафедры Промышленного и гражданского строительства Юго-западного государственного университета (г. Курск). Все образцы были изготовлены за две бетонировки. При этом использовался щебень крупностью 5-10 мм. Фракции просеивались в лаборатории строительных материалов перед бетонировкой строго по ситам. Бетонированию предшествовала лабораторная проверка расчетных составов и их корректировка.

Проектный состав бетона опытных образцов класса В20 включал в себя на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси: 335 кг цемента марки М400, 740 кг песка и 1108 кг мелкого заполнителя – щебня (фракцией 5–10 мм), 200 литров воды. При этом осадка конуса бетонной смеси составляла 6–8см.

Одновременно с основными железобетонными конструкциями для определения прочностных и деформативных характеристик бетона в возрасте 28 суток и в момент испытаний, – изготавливались вспомогательные бетонные образцы из бетонов того же состава: кубы 100×100×100 – 12 шт., бетонные призмы сечения 100×100×400 – 12 шт.

При этом фактическая прочность кубов бетона на сжатие в соответствии с ГОСТ 10180–90 составила: для сжатой зоны образцов всех серии 37,5 МПа, для образцов всех серий (растянутой зоны) 25,6 МПа.

Для призм сплошного сечения фактическая прочность бетона на сжатие составила: для проектного класса бетона В20 – 19,87 МПа. Переход к нормативным характеристикам позволяет получить нормативную призмную прочность.

Для проектного класса бетона В20 она составляет 15,47 МПа. Переход к расчетным характеристикам позволяет получить расчетную призмную прочность.

Для проектного класса бетона В20 она составляет 11,85 МПа.

Фактическая прочность бетона на растяжение составила: для проектного класса бетона В20 – 1,787 МПа. Нормативная прочность бетона на растяжение составила: для проектного класса бетона В20 – 1,325 МПа.

Начальный модуль упругости бетона для проектного класса бетона В20 составили  $2,74 \cdot 10^4$  МПа.

Полученные характеристики бетонов и арматуры удовлетворяют требуемым условиям, согласно которым выполняется разделение опытных железобетонных образцов на три серий в соответствии с табл. 1.

Конструкции каркасов и опалубка для бетонирования основных образцов включала четыре деревянные формы, покрытые жстью.

**Методика проведения эксперимента.** Железобетонные образцы испытываются в горизонтальном положении (со свободным доступом к растянутой зоне), что позволяет детально изучить картину образования, развития и раскрытия трещин. Испытательная установка позволяет реализовывать намеченную схему нагружения с заданной длиной и варьированием плеча приложения нагрузки (рис. 1).

Размещение механических приборов показано на рис. 2. Здесь же показаны зоны установки электротензорезисторов базой 20 мм.

Учитывая, что исследования такого дифференциального параметра, как ширина раскрытия трещин, проводятся с позиции механики разрушения, то это находит отражение в методике проведения эксперимента. Электротензорезисторы устанавливаются по высоте расчетных поперечных сечений экспериментальных конструкций основных серий; в фибровых волокнах; в местах определения нулевой точки, т. е. перехода от удлинения к укорочению и в сжатой зоне бетона (рис. 2). Целью установки электротензорезисторов является изучение распределения деформаций по высоте сжатой зоны и в окрестностях, прилегающим к фибрам; определения размеров сжатой зоны и фактической высоты развития пространственных трещин.

При разработке методики экспериментальных исследований предусматриваются три группы электротензорезисторов на основные опытные железобетонные конструкции. На рис. 3 приняты следующие обозначения: *ИБ1* – индикатор часового типа (ИЧТ) с ценой деления 0,001 мм для измерения линейных перемещений бетона, расположенный на сжатой фибре бетона, установленный на базе 250 мм; *ИБ2* – то же, для измерения линейных перемещений сжатого бетона на расстоянии 30 мм выше оси индикатора *ИБ1*, установленный на базе 250 мм; *ИБ3* – то же, для измерения линейных перемещений сжатого бетона 50 мм выше оси индикатора *ИБ1*, установленный на базе 250 мм; *ИА1* – ИЧТ с ценой деления 0,001 мм для измерения линейных перемещений растянутой арматуры, установленный на базе 250 мм; *Р1* – прогибомер, ИЧТ с ценой деления 0,01 мм для измерения перемещений испытываемой конструкции, установленный на уровне ее геометрического центра; *Р2* – прогибомер, ИЧТ с ценой деления 0,01 мм для измерения перемещений испытываемой конструкции, установленный в правой части (на краю) конструкции по центру ширины образца; *Р3* – прогибомер, ИЧТ с ценой деления 0,01 мм для измерения перемещений испытываемой конструкции, установленный в левой части (на краю) конструкции по центру ширины образца; *Р4* – прогибомер, ИЧТ с ценой деления 0,01 мм для измерения перемещений левой консоли (левого края образца от действия кручения с изгибом) испытываемой конструкции, установленный по центру половины ширины образца; *Р5* – прогибомер, ИЧТ с ценой деления 0,01 мм для измерения перемещений правой консоли (правого края образца от действия кручения с изгибом) испытываемой конструкции, установленный по центру половины ширины образца; *Р6, Р7* – прогибомеры, ИЧТ с ценой деления 0,01 мм для измерения углов кручения по обоим торцам образца, на расстояниях 300 мм по горизонтали от геометрического центра поперечного сечения испытываемой железобетонной конструкции.

КИП-II-1,6  
Количество - 2 шт.

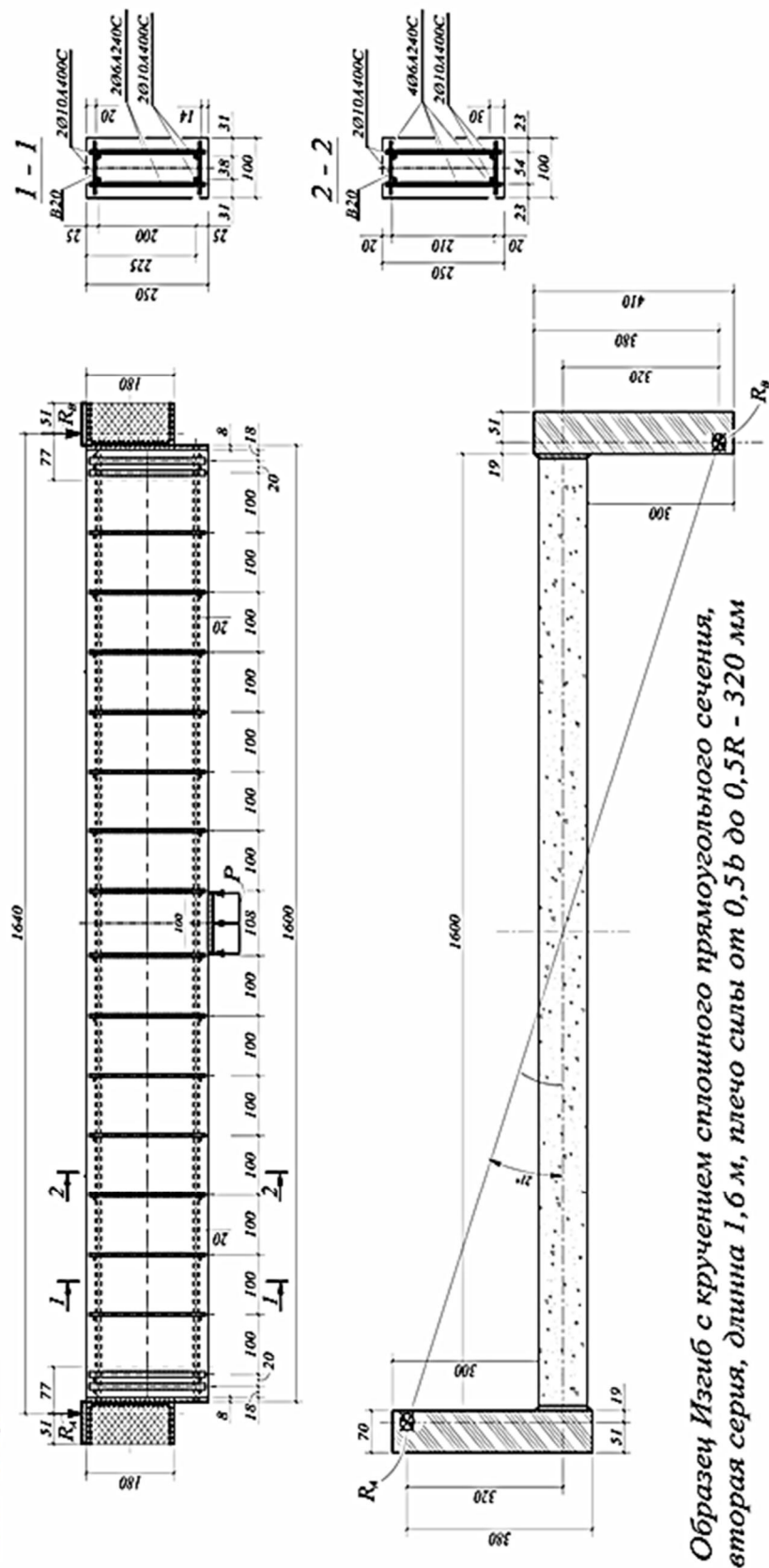
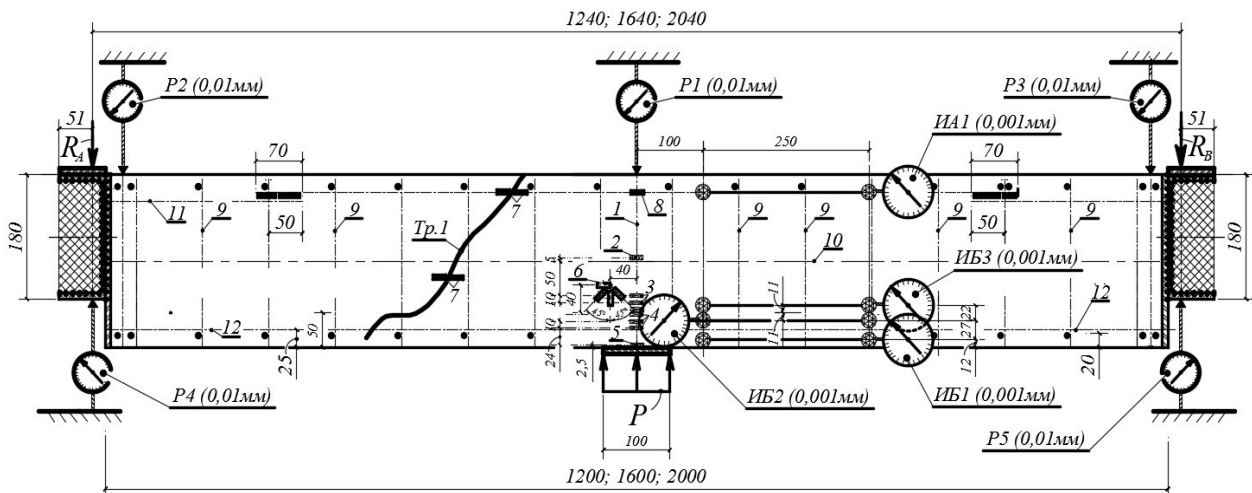


Рисунок 1 – Конструкция, армирование и схема нагружения опытного образца второй серии сплошного сечения КИП-II-1,6



**Рисунок 2 – Схема расположения механических приборов и электротензорезисторов, установленных при испытании железобетонных конструкций при действии кручения изгибом :**

- 1 – вертикальная ось симметрии образца; 2 – электротензорезисторы, расположенные сверху от нейтральной оси 10; 3 – то же, расположенные в зоне сжатого бетона; 4 – то же, в зоне, прилегающей к нейтральной оси. 5 – электротензорезисторы, расположенные на фибре бетона; 6 – розетка электротензорезисторов, расположенная на удалении 40 мм от вертикальной оси образца 1; 7 – электротензорезисторы, расположенные на берегах появившейся трещины; 8 – то же, на уровне оси растянутой арматуры; 9 – ось вертикальных арматурных хомутов; 10 – средняя нейтральная ось; 11 – ось растянутой арматуры; 12 – ось сжатой арматуры

**I группа электротензорезисторов** (рис. 2). Электротензорезисторы устанавливаются по высоте (среднего по длине железобетонной конструкции) поперечного сечения, экспериментальных железобетонных конструкций основных серий в фибровых волокнах, в местах определения нулевой точки, т. е. перехода от удлинения к укорочению. Целью установки электротензорезисторов является изучение распределения деформаций по всей высоте сжатой зоны, определение размеров сжатой зоны и фактической высоты развития трещин. Для обеспечения надежности и дополнения опытной информации предусматриваются розетки (составляющие II группу электротензорезисторов), расположенные в двух одинаково напряженных (симметричных) сечениях.



**Рисунок 3 – Общий вид установки электротензорезисторов на бетон**

**II группа электротензорезисторов** – розетки, образованные четырьмя электротензорезисторами под углом  $45^\circ$ , наклеенные на бетон. Схема размещения электротензорезисторов II группы приведена на рис. 2 и рис. 3.

**III группа электротензорезисторов** – электротензорезисторы, устанавливаемые на берегах образуемых трещин на уровне оси растянутой арматуры. Схема размещения электротензорезисторов III группы приведена на рисунке 2.

**Обоснование полученных результатов.** Для повышения достоверности экспериментальных данных работа электротензорезисторов дублировалась (там, где это возможно) с помощью механических приборов (с ценой деления  $0,001\text{мм}$ ) (рис. 3). При этом также устанавливались механические приборы вдоль оси наиболее растянутой арматуры

номенклатуры экспериментальных данных работа электротензорезисторов дублировалась (там, где это возможно) с помощью механических приборов (с ценой деления  $0,001\text{мм}$ ) (рис. 3). При этом также устанавливались механические приборы вдоль оси наиболее растянутой арматуры

(рис.3), которые дают возможность определить средние деформации арматуры и в сочетании с другими механическими приборами и тензорезисторами, – проверить гипотезу плоских сечений в поперечном сечении (среднем по длине железобетонной конструкции) для средних деформаций бетона и арматуры. Для измерения максимальных прогибов устанавливались прогибомеры (с ценой деления 0,01 мм) – рис. 2.

С целью исключения влияния окружающего бетона на положение гаек при деформациях (установленных на рабочую арматуру), на гайки надевались специальные резиновые трубки перед бетонировкой, а торцы гаек закрывались с помощью пластилина.

Перед началом испытаний производилось тщательное освидетельствование конструкции, т.е. отмечались начальные трещины, раковины, искривления и др.

С целью извлечения максимума информации каждый образец испытывался с доведением до разрушения. Нагружение железобетонных конструкций осуществлялось плавно, – мелкими ступенями, составляющими  $0,1M_{кр}$ . Это необходимо для выявления особенностей деформирования при образовании трещин первого, второго и т.п. уровней. Выдержка на ступенях контрольной нагрузки по трещиностойкости и жесткости осуществлялась в течение не менее часа. Выдержка на всех ступенях, кроме контрольной, для проверки жесткости и трещиностойкости составляла не менее получаса. В процессе кратковременного нагружения отсчеты по механическим приборам и датчикам снимались дважды на этапе: сразу после приложения нагрузки и после выдержки.

Перед ожидаемым моментом трещинообразования растянутая зона каждой балки тщательно осматривалась, появление трещин фиксировалось визуально и с помощью микроскопа МПБ-2 с 24-х кратным увеличением и ценой деления 0,05мм с точностью до 0,025мм. По мере дальнейшего нагружения проводились наблюдения за появлением новых трещин и развитием уже имеющихся; замерялась ширина раскрытия трещин на двух боковых гранях в выше отмеченных уровнях (расположенных выше оси арматуры на 20мм и 30 мм, соответственно) вдоль всего профиля трещины, рис. 4. Картина трещин, их раскрытие и распространение на каждой ступени наносилась на специальные планшеты в масштабе 1:1.

Экспериментальные исследования позволили заметно уточнить зависимости для определения основных параметров ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций их прогибов (рис. 5),  $R_{sup,кр}$  и координат образования пространственных трещин.

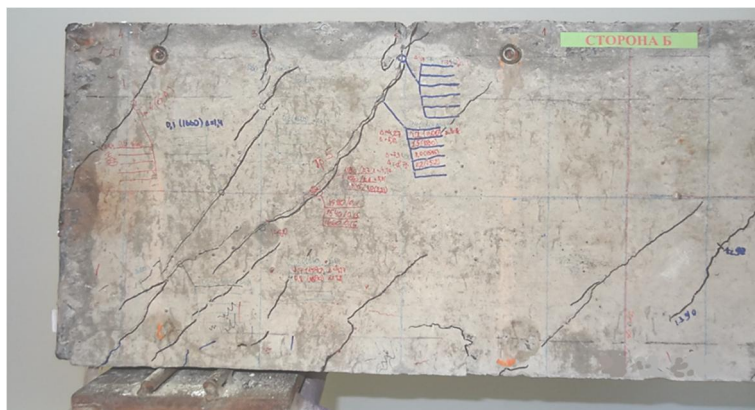


Рисунок 4 – Картина образования и развития трещин при проведении испытаний железобетонных конструкций второй серии на кручение с изгибом

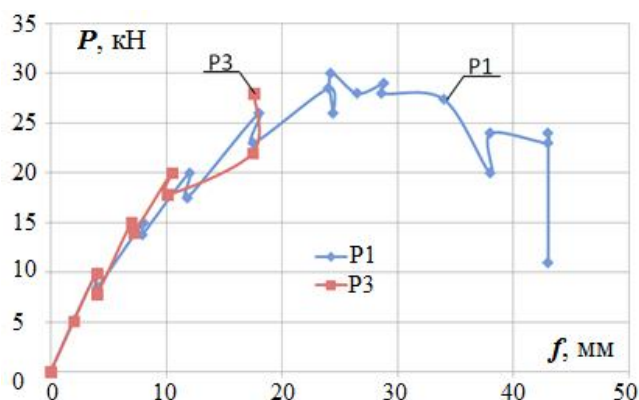


Рисунок 5 – Графики зависимости прогибов в конструкции КИП-II-1,6



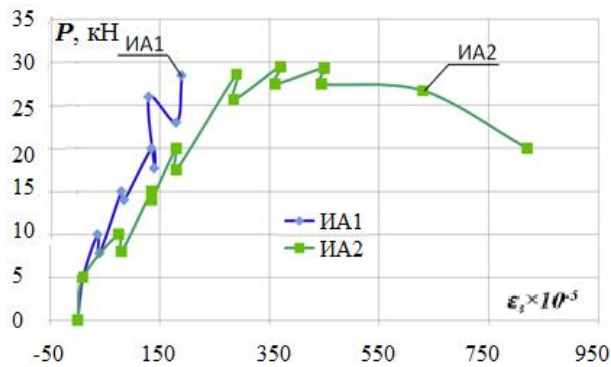


Рисунок 6 – Графики зависимости деформаций арматуры конструкции КИП-II-1,6

трещин на уровне оси продольной и поперечной растянутой арматуры вдоль всего профиля трещин; изменения расстояния между трещинами  $l_{crc}$  и длины трещин  $h_{crc}$  по мере увеличения гравитационной нагрузки (с проверкой многоуровневого процесса образования трещин); деформаций сжатого бетона (рис. 7, рис. 8) и рабочей продольной арматуры (рис. 6) при сложном напряженно-деформированном состоянии и др.

Для анализа в статье приведены графики деформаций, в том числе, полученных по показаниям электротензометрических розеток (рис. 3, рис. 8). Более того, полученная экспериментальная информация может дать более полное представление об особенностях сопротивления железобетона в целом.

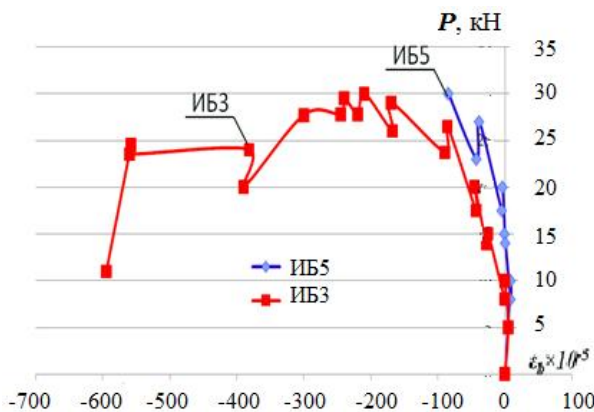


Рисунок 7 – Графики зависимости деформаций бетона конструкции КИП-II-1,6

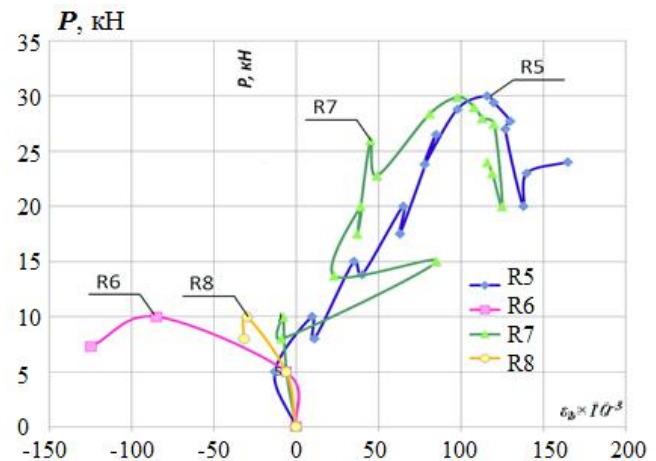


Рисунок 8 – Графики зависимости деформаций бетона по показаниям розетки тензорезисторов в опытной конструкции КИП-II-1,6

**Выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.** На основании разработанной методики экспериментальных исследований железобетонных конструкций, представляется возможным проверить предложенную расчетную модель и рабочие гипотезы, а также получить достоверные данные о расчетных параметрах и сложном напряженно-деформированном состоянии в исследуемых областях при действии изгибающего, крутящего моментов и поперечной силы.

Выполненные экспериментальные исследования охватывают широкий круг вопросов, которые так необходимы при разработке нового расчетного аппарата железобетонных конструкций (и в первую очередь для выяснения трещинообразующей и разрушающей нагрузки, координат образования пространственных трещин) на действие кручения с изгибом.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования, представляют возможность проверки достоверности расчетного аппарата ширины раскрытия трещин железобетонных конструкций при действии кручения с изгибом, расстояний между трещинами (при проверке многоуровневого процесса их образования) и дают возможность убедиться в адекватности рабочих гипотез при варьировании длины образцов, крутящего и изгибающего моментов, класса бетона, и в заметной степени дополняют имеющийся фактический материал.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Salnikov, A. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending (2015) / A. Salnikov, Vl. Kolchunov, I. Yakovenko // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vols. 725-726. – pp. 784–789.
2. Сальников А. С. Расчетная модель образования пространственных трещин первого вида при кручении с изгибом / А. С. Сальников, Вл. И. Колчунов, И. А. Яковенко // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2015. – №3. – С. 35–40.
3. Сальников А. С. Методика расчета предельной нагрузки и координат образования пространственной трещины первого вида в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом / А. С. Сальников, В. И. Колчунов, В. И. Колчунов // *Строительство и реконструкция*. – 2015. – №6(62). – С. 49–56.
4. Сальников А. С. Метод определения минимальной нагрузки и координат образования пространственной трещины в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом / А. С. Сальников, Н. В. Ключева, В. И. Колчунов // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2016. – №1. – С. 52–57.
5. Ключева Н. В. К расчету ширины раскрытия наклонных трещин третьего типа в составных железобетонных конструкциях / Н. В. Ключева, И. А. Яковенко, Н. В. Усенко // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2014. – №2. – С. 8–11.
6. Ключева Н. В. Жилые и общественные здания из железобетонных панельно-рамных элементов индустриального производства / Н. В. Ключева, В. И. Колчунов, Д. А. Рыпаков, А. С. Бухтиярова // *Жилищное строительство*. – 2015. – №5. – С. 69–75.
7. Бондаренко В. М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона : монография / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. – М. : АСВ, 2004. – 472 с.
8. Голышев А.Б. Сопротивление железобетона: монография / А.Б. Голышев, В. И. Колчунов. – К. : Основа, 2009. – 432 с.
9. Колчунов Вл. И. Экспериментальные исследования трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом / Вл. И. Колчунов, А. С. Сальников // *Строительство и реконструкция*. – 2016. – №3(65). – С. 24–32.

**Демьянов Алексей Иванович**

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: [speccompany@gmail.com](mailto:speccompany@gmail.com)

**Сальников Алексей Сергеевич**

ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», г. Брянск

Аспирант

E-mail: [vlik52@mail.ru](mailto:vlik52@mail.ru)

**Колчунов Владимир Иванович**

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства

E-mail: [vlik52@mail.ru](mailto:vlik52@mail.ru)

---

A.I. DEM'YANOV, A.S. SALNIKOV, VL.I. KOLCHUNOV

## THE EXPERIMENTAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS IN TORSION WITH BENDING AND THE ANALYSIS OF THEIR RESULTS

*It is proposed the program and methodology of experimental researches of reinforced concrete constructions under the action torsion with bending, the main purpose of which is to check the calculation assumptions and the experimental determination of the design parameters of the proposed calculation method.*

*The experimental researches are performed in order to test the proposed method of calculation and identify patterns and parameters of cracking, development and crack opening, and criteria for the destruction reinforced concrete constructions by torsion with bending. The most important ones are follows: the generalized load  $R_{sup,crc}$ ,  $R_{sup,u}$ , the coordinates of spatial cracks formation, the width of spatial crack opening at the level of the axis of the longitudinal and transverse tensile armature along the entire profile of cracks; changing the distance between the cracks  $l_{crc}$  and crack length  $h_{crc}$  increasing the deformation load (with checking multilevel process of crack formation); compression strain of concrete and armature at the complex stress-strain state and others. The graphs of deformations are shown in the article for the analysis including on indications received by strain gauge transducers.*

**Keywords:** experimental studies, reinforced concrete constructions, cracking, torsion with bending, deformation analysis.

## BIBLIOGRAPHY

1. Salnikov, A. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending (2015) / A. Salnikov, Vl. Kolchunov, I. Yakovenko // Applied Mechanics and Materials. – 2015. - Vols. 725-726. - pp. 784–789.
2. Salnikov A. S. Raschetnaya model obrazovaniya prostranstvennykh treschin pervogo vida pri kruchenii s izgibom / A. S. Salnikov, Vl. I. Kolchunov, I. A. Yakovenko // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 2015. – №3. – P. 35–40.
3. Salnikov A. S. Metodika rascheta predelnoy nagruzki i koordinat obrazovaniya prostranstvennoy treschiny pervogo vida v zhelezobetonnykh konstruktsiyah pri kruchenii s izgibom / A. S. Salnikov, V. I. Kolchunov, V. I. Kolchunov // Stroitelstvo i rekonstruktsiya. – 2015. – №(62). – P. 49–56.
4. Salnikov A. S. Metod opredeleniya minimalnoy nagruzki i koordinat obrazovaniya prostranstvennoy treschiny v zhelezobetonnykh konstruktsiyah pri kruchenii s izgibom / A. S. Salnikov, N. V. Klyueva, V. I. Kolchunov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 2016. – №1. – P. 52–57.
5. Klyueva N. V. K raschetu shiriny raskryitiya naklonnykh treschin tretogo tipa v sostavnykh zhelezobetonnykh konstruktsiyah / N. V. Klyueva, I. A. Yakovenko, N. V. Usenko // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 2014. – №2. – P. 8–11.
6. Klyueva N. V. Zhilye i obschestvennyye zdaniya iz zhelezobetonnykh panelno-ramnykh elementov industrialnogo proizvodstva / N. V. Klyueva, V. I. Kolchunov, D. A. Ryipakov, A. S. Buhtiyarova // Zhilishchnoe stroitelstvo. – 2015. – №5. – P. 69–75.
7. Bondarenko V. M. Raschetnyye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona : monografiya / V. M. Bondarenko, V. I. Kolchunov. – M. : ASV, 2004. – 472 p.
8. Golyishev A.B. Soprotivlenie zhelezobetona: monografiya / A.B. Golyishev, V. I. Kolchunov. – K. : Osnova, 2009. – 432 p.
9. Kolchunov Vl. I. Eksperimentalnyye issledovaniya treschinoobrazovaniya zhelezobetonnykh konstruktsiy pri kruchenii s izgibom / Vl. I. Kolchunov, A. S. Salnikov // Stroitelstvo i rekonstruktsiya. – 2016. – №3(65). – P. 24–32.

### A.I. Dem'yanov

Southwest State University, Kursk  
Candidate of Technical Sciences, associated professor  
E-mail: [speccompany@gmail.com](mailto:speccompany@gmail.com)

### A.S. Salnikov

Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk  
Postgraduate student  
E-mail: [vlik52@mail.ru](mailto:vlik52@mail.ru)

### Vl.I. Kolchunov

Southwest State University, Kursk  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Industrial and Civil Engineering Department  
E-mail: [vlik52@mail.ru](mailto:vlik52@mail.ru)

КОЛЧУНОВ В.И., ПОТАПОВ В.В., ДМИТРИЕВА К.О., ИЛЬИН В.А.

## РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ДЛИТЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ЗДАНИЕ-ОСНОВАНИЕ» ХРАНИЛИЩА ЯДЕРНЫХ ОТХОДОВ АЭС

*Приведены результаты расчета пространственной геотехнической модели "здание - основание" комплекса зданий хранилища ядерных отходов АЭС. Результаты расчетов в виде средних и максимальных осадок и кренов рассматриваемого объекта сопоставлены с данными геодезического мониторинга. По результатам этого анализа сделан вывод о возможности продления эксплуатации хранилища ядерных отходов на очередной нормативный срок. Учитывая, что стабилизация осадок блоков здания не наступила, рекомендовано продлить геодезический контроль осадок и крена рассматриваемого объекта.*

**Ключевые слова:** эксплуатационная надежность, осадка, крен, расчетный анализ, геодезический контроль

Одной из важнейших задач поддержания эксплуатационной надежности объектов атомной энергетики повышенного уровня ответственности в безопасном состоянии является проведение комплекса мероприятий по обследованию, оценке технического состояния и обоснованию возможности продления срока эксплуатации, включающего выполнение расчетного анализа эксплуатируемых зданий и сооружений [1-4]. В рамках этих задач ЮЗГУ и АО «ВНИИАЭС» по результатам проведенного обследования хранилища ядерных отходов (ХОЯТ) выполнен расчетный анализ пространственной геотехнической системы «здание-основание» данного объекта и даны предположения по мероприятиям для продления эксплуатации комплекса зданий ХОЯТ.

Комплекс зданий ХОЯТ включает в себя (рис. 1) транспортно-технологический блок (ТТБ), химический блок (ХБ) и административно-бытовой блок (АББ). Трехэтажное здание химблока выполнено в железобетонном каркасе, расположено в осях 5-11 и рядах "А-Г", имеет размеры в плане 15х36 метров. В здании размещены установки очистки и охлаждения воды бассейнов, узел приготовления десорбирующих растворов, помещения сбора и откачки отходов и другие помещения.

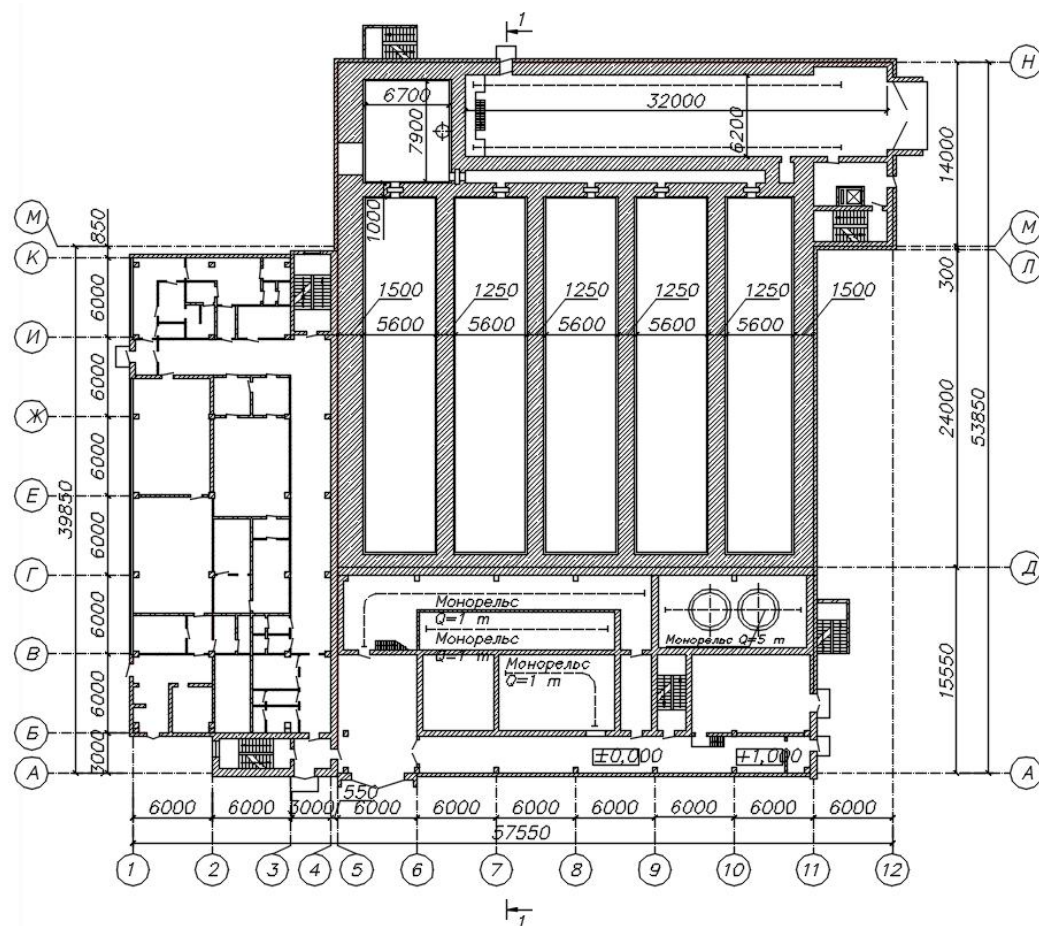
Сооружение транспортно-технологического блока бескаркасное с несущими монолитными и сборно-монолитными конструкциями, расположено в осях 5-12 и рядах "Д-Н", имеет два уровня по высоте. Основная часть высотой 21,0 м представляет собой бассейн для выдержки пеналов с отработанным ядерным топливом. Бассейн разделен на пять отсеков, заполненных водой на высоту 10,7 м. Над бассейном установлено балочное перекрытие для технологических подвесок. Покрытие бассейна выполнено по металлическим фермам.

Отделение приема и перегрузки кассет расположено в осях 5-17 по ряду "М-Н", имеет высоту 39 м и оборудовано мостовым краном грузоподъемностью 200 кН. Днище сооружения - сплошная фундаментная плита толщиной 1,5 м.

Трехэтажное здание административно-бытового блока расположено в осях 1-4 и рядах "А-К", выполнено в сборном железобетонном каркасе в виде трехпролетной рамы 6х6х3 м с шагом колонн 6 м, с верхним этажом пролетом 12 м, оборудованным подвесным краном грузоподъемностью 50 кН.

Первые два блока комплекса ХОЯТ в соответствии с [5] относятся к объектам повышенного уровня ответственности и к первой категории ответственности по ПиН АЭ-5.6 [6] и в соответствии с [6, 7] должны быть рассчитаны помимо основного на особые сочетания нагрузок [8, 9], включая аварийные воздействия, вызванные внезапным выключением одного из несущих элементов конструкций.

а)



б)

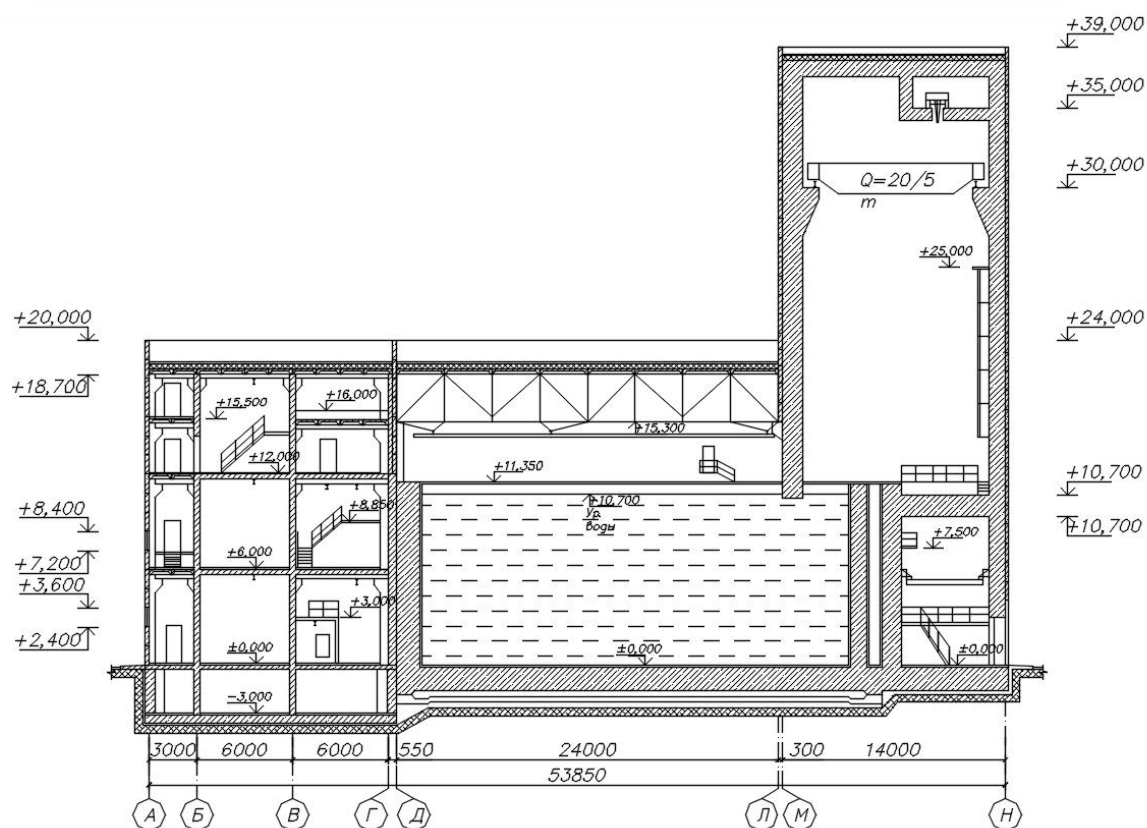


Рисунок 1 - Схема плана (а) и разрез 1-1 (б) здания ХОЯТ



Целью расчетного анализа системы «здание-основание» явилось определение осадок и крена зданий, вызванного неравномерными деформациями основания эксплуатируемых объектов. При этом поверочные расчеты проводились с учетом результатов обследования технического состояния надземных конструкций и результатов анализа изменений во времени геологических характеристик грунтового основания, определенных при бурении контрольных скважин.

Расчет выполнен с использованием верифицированного программного комплекса «SCADOffice». При создании расчетных моделей (рис. 2) были приняты фактические геометрические, жесткостные и физические характеристики материалов и конструкций блоков зданий, уточненные по результатам обследования рассматриваемых объектов.

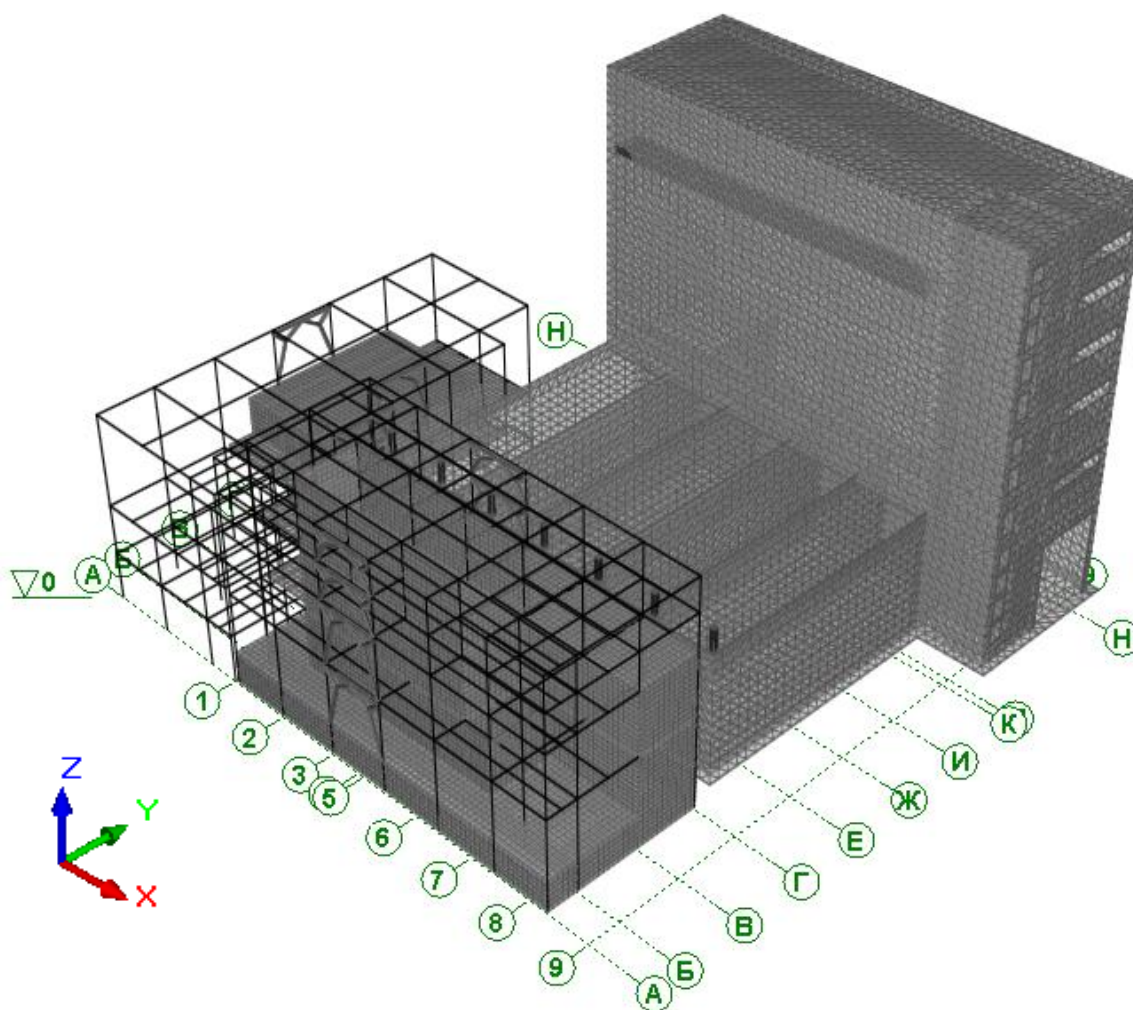


Рисунок 2 – Расчетная схема блоков комплекса зданий ХОЯТ

Анализ полученных результатов расчета позволяет отметить следующее. Среднее значение расчетной осадки основания здания ТТБ при равномерном загрузении бассейна на период обследования (2016 год) составила 108 мм. Относительное значение разности осадок при равномерном заполнении бассейна (рис. 3) по оси X оставило 0,000438, а по оси Y - 0,000426. При неравномерном заполнении бассейна эти величины, соответственно были равны 0,00049 и 0,00037.

Было проведено сопоставление полученных расчетных значений осадок с данными мониторинга фактических деформаций, полученных по результатам геодезических наблюдений в соответствии со схемой установленных на здании осадочных марок (рис. 4). При этом как и при проведении расчета анализировались два варианта заполнения бассейна: заполнение двух

крайних отсеков и равномерное заполнение всех отсеков бассейна. Сопоставляя изменения осадок по двум направлениям: в сечениях 1-1 и 2-2 (рис. 4), можно отметить, что расчетные значения осадок практически по всем маркам превышают значения, полученные по результатам геодезических наблюдений на период обследования.

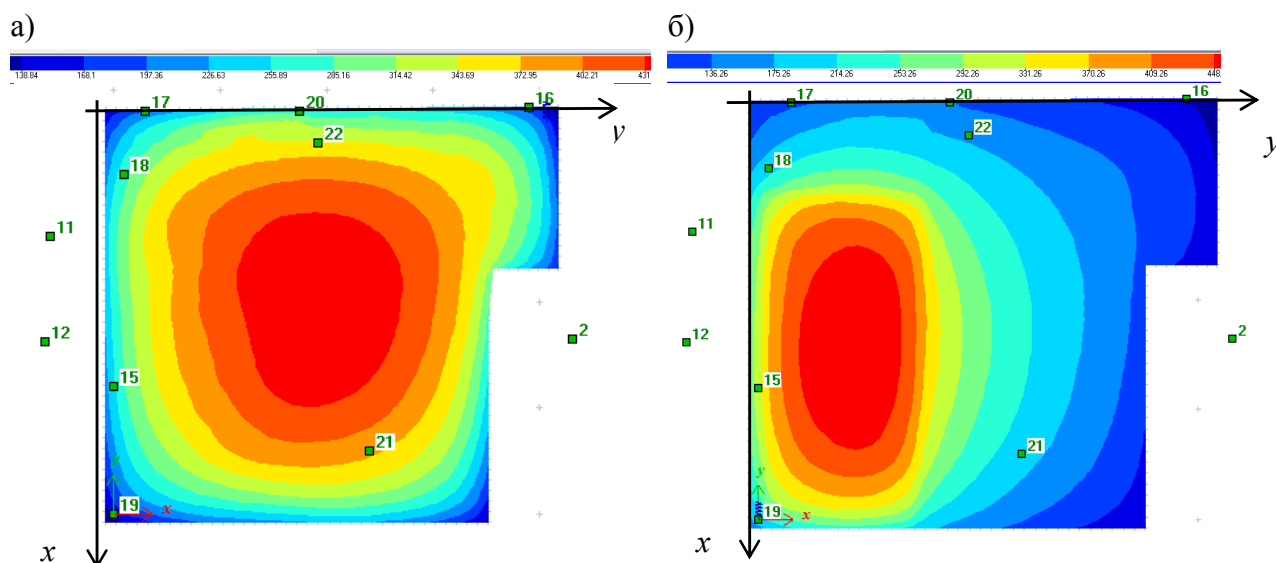


Рисунок 3—Общая картина осадок основания здания ТТБ при равномерном (а) и при неравномерном (б) заполнении бассейна

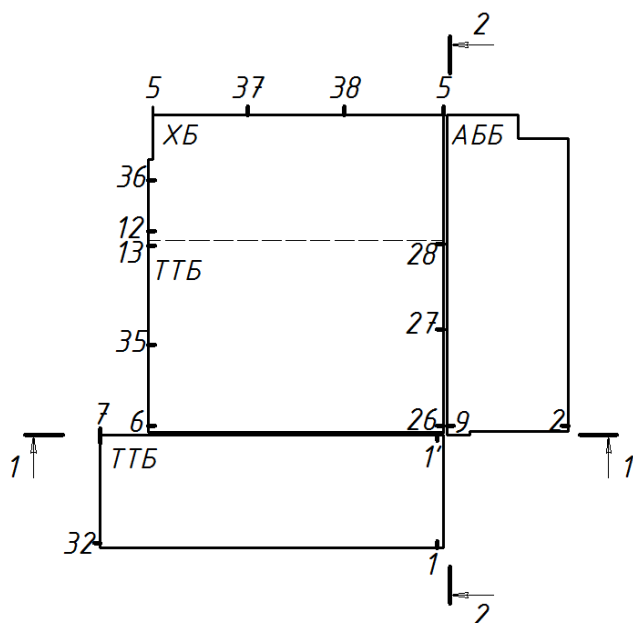


Рисунок 4 – Схема расположения осадочных марок на блоках комплекса зданий ХОЯТ

Максимальная расчетная осадка здания ТТБ происходит при неравномерном заполнении бассейна и составляет 117,63 мм. Наибольшие перемещения измеренные по результатам геодезических наблюдений к моменту проведения обследований в зоне марки 26 составили 110 мм. Среднее изменение вертикального с перемещения по зданию ТТБ составило 77,4 мм, среднее расчетное значение осадки фундамента составило 90 мм при допустимой согласно [8] величине 200 мм согласно.

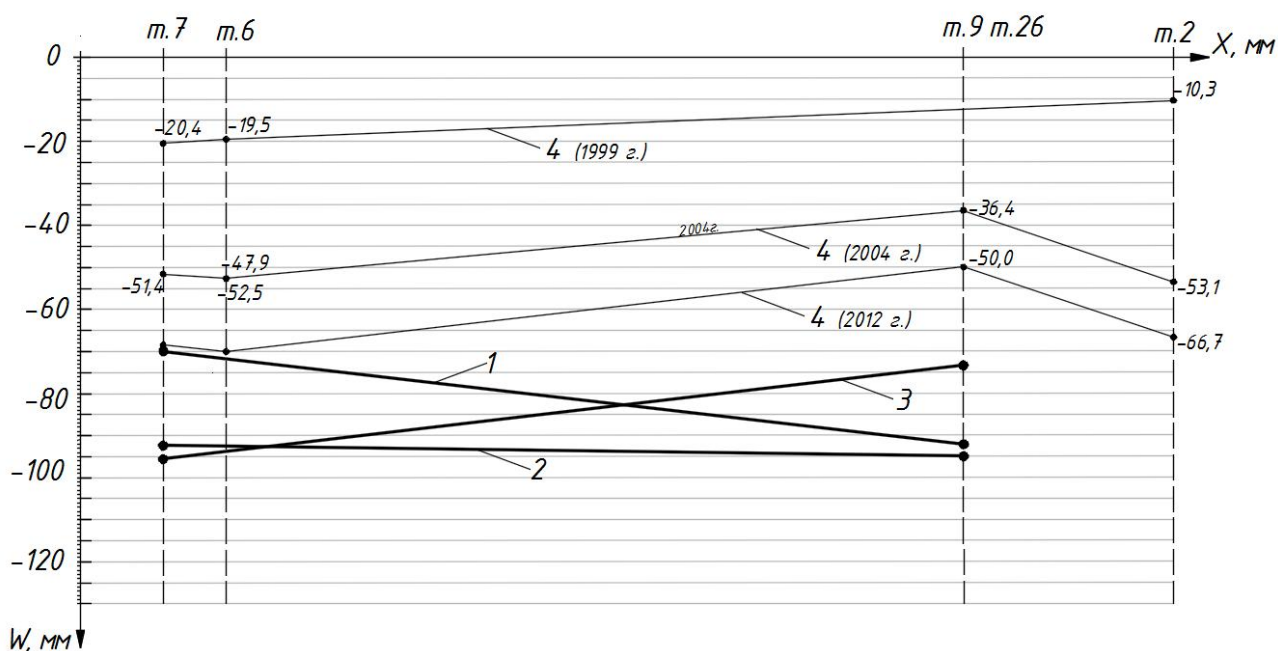
Полученные теоретические и вычисленные по результатам мониторинга значения крена фундамента здания ТТБ соответственно составили 0,001217 мм/м и 0,0013 мм/м при допустимой величине 0,0030 мм/м.

Полученные результаты расчета по принятой геотехнической модели комплекса зданий ХОЯТ и результаты сопоставления с результатами геодезического мониторинга осадок фундаментов позволяют сделать следующие обобщения.

Расчетные значения средних осадок сооружения ТТБ на период обследования (2016 г.) во всех случаях были больше значений средние значения осадок полученных геодезическим мониторингом по контрольным точкам (осадочная марка). При допустимой средней осадке

сооружения 200 мм среднее расчетное значение осадки при всех вариантах загрузки бассейна не превышает 117 мм. Среднее же значение перемещений, измеренных по осадочным маркам, составило 77,4 мм.

а)



б)

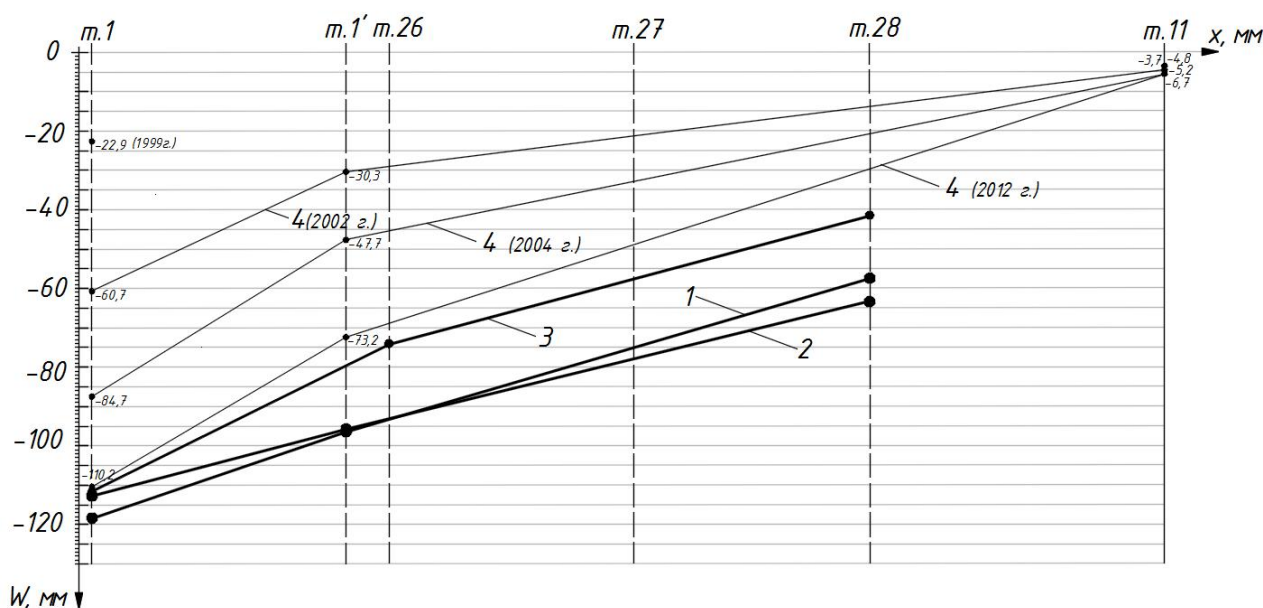


Рисунок 5— Теоретические и фактические вертикальные смещения осадочных марок по направлениям 1-1 (а) и 2-2 (б): 1 —расчетные при неравномерном заполнении бассейна (заполнены 2 шлюза между осями 5-7); 2 —то же, при равномерном заполнении бассейна; 3 —то же, при неравномерном заполнении бассейна (заполнены 2 шлюза между осями 9-11); 4 - фактические вертикальные смещения осадочных марок ТТБ по данным эксплуатационных наблюдений

Относительный крен фундаментов сооружения составил 1,13 мм/м, фактическое по результатам мониторинга - 1,10 при допустимой величине 3 мм/м. Скорость нарастания средней осадки блока ТТБ за пятилетний период с конца 2009 по конец 2014 годы составила 1,2 мм/год.

Из этого следует, что согласно требований нормативного документа [8] стабилизация осадок сооружения до настоящего времени не наступила.

Среднее измеренное по результатам мониторинга увеличение крена сооружения за период с 2002 по 2014 год составило 0,027 мм/год.

#### **Общий вывод.**

Проведенный расчетный анализ длительного деформирования системы «здание - основание» хранилища ядерных отходов АЭС в сопоставлении с результатами геодезического мониторинга осадок фундамента этого объекта показал, что основные нормируемые параметры (осадки сооружения, разность осадок для различных точек основания и крены здания) не превысили допустимые значения, определяемые действующими национальными и отраслевыми стандартами.

Учитывая, что расчетные значения осадок в контролируемых точках основания ХОЯТ во всех случаях больше фактически измеренных значений по контрольным маркам и, не смотря на то, что для всех блоков комплекса зданий ХОЯТ стабилизация осадок не наступила, эксплуатация объекта после обследования может быть продлена на очередной нормативный срок. При этом в обязательном порядке следует продолжить геодезический мониторинг за осадками и кренами комплекса зданий ХОЯТ.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Травуш, В.И. Безопасность среды жизнедеятельности - смысл и задача строительной науки [Текст] / В.И. Травуш, С.Г. Емельянов, В.И. Колчунов // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – №7. – С. 20-27.
2. Саргсян, А.Е. Тестирование параметров разработанной механической статической модели основания свайного фундамента [Текст] / А.Е. Саргсян, В.С. Герашенко // Сборник трудов ОАО «Атомэнергопроект». – М., 2013. – Выпуск 13. – С. 60-71.
3. Саргсян, А.Е. Обоснования разработанной пространственной модели свайных фундаментов поданными натурных наблюдений осадков сооружения РО Ростовской АЭС [Текст] / А.Е. Саргсян // Сборник трудов ОАО «Атомэнергопроект». – М., 2013. – Выпуск 13. – С. 72-83.
4. СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» [Текст]. Введен 2003-08-21, изд. официальное. – М.: Госстрой России, 2003. – 54 с.
5. Федеральный закон №384 от 30.12.09 г. «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
6. ПИН АЭ-5.6 Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. – Москва, 1999.
7. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – Москва, 2014.
8. СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» [Текст]. Введен 2011-05-20, изд. официальное. – М.: Минрегион России, 2011. – 161 с.
9. Бирбраер, А. Н. Экстремальные воздействия на сооружения / А. Н. Бирбраер, А. Ю. Роледер. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 594 с
10. СП 20.13330.2016 "Нагрузки и воздействия" [Текст]. Введен 2017-06-04, изд. официальное. – М.: Минрегион России, 2016. – 102 с.

#### **Колчунов Виталий Иванович**

Юго-Западный государственный университет,  
г. Курск  
Доктор технических наук, зав. кафедрой "Уникальные  
здания и сооружения"  
E-mail: [asiorel@mail.ru](mailto:asiorel@mail.ru)

#### **Потапов Владимир Вячеславович**

АО "ВНИИАЭС", г. Москва  
кандидат технических наук, заместитель  
генерального директора  
E-mail: [vniiates@vniiates.ru](mailto:vniiates@vniiates.ru), [www.vniiates.ru](http://www.vniiates.ru)

#### **Дмитриева Ксения Олеговна**

Юго-Западный государственный университет,  
г. Курск  
Кандидат технических наук, ст. преподаватель ка-  
федры промышленного и гражданского строитель-  
ства  
E-mail: [dko1988@yandex.ru](mailto:dko1988@yandex.ru)

#### **Ильин Владимир Алексеевич**

АО "ВНИИАЭС", г. Москва  
Начальник отдела  
E-mail: [vniiates@vniiates.ru](mailto:vniiates@vniiates.ru), [www.vniiates.ru](http://www.vniiates.ru)

V.I. KOLCHUNOV, V.V. POTAPOV, K.O. DMITRIEVA, V.A. ILIIN

## DESIGN ANALYSIS OF THE LONG-TERM DE-FORMATION OF THE SYSTEM "BUILD-BASED" THE STORAGE OF NUCLEAR WASTES OF NPPS

*The results of calculation of the spatial geotechnical model "building - foundation" of the nuclear waste storage facility of the nuclear power plant are presented. The results of calculations in the form of average and maximum sediments and rolls of the object under consideration are compared with the data of geodetic monitoring. Based on the results of this analysis, it was concluded that it is possible to extend the operation of the nuclear waste storage facility for another regulatory period. Given that the stabilization of the sediment of the building blocks has not come, it is recommended to extend the geodetic control of the sediment and roll of the object under consideration.*

**Key words:** operational reliability, draft, roll, calculation analysis, geodetic control

### BIBLIOGRAPHY

1. Travush, V.I. Bezopasnost' sredy zhiznedeyatel'nosti - smysl i zadacha stroitel'-noy nauki [Tekst] / V.I. Travush, S.G. Yemel'yanov, V.I. Kolchunov // Promyshlennoye i grazh-danskoye stroitel'stvo. – 2015. – №7. – S. 20-27.
2. Sargsyan, A.Ye. Testirovaniye parametrov razrabotannoy mekhanicheskoy staticheskoy modeli osnovaniya svaynogo fundamenta [Tekst] / A.Ye. Sargsyan, V.S. Gerashchenko // Sbornik trudov OAO «Atomenergoprojekt». – M., 2013. – Vypusk 13. – S. 60-71.
3. Sargsyan, A.Ye. Obosnovaniya razrabotannoy prostranstvennoy modeli svaynykh fundamentov podannymi naturnykh nablyudeniye osadkov sooruzheniya RO Rostovskoy AES [Tekst] / A.Ye. Sargsyan // Sbornik trudov OAO «Atomenergoprojekt». – M., 2013. – Vypusk 13. – S. 72-83.
4. SP 13-102-2003 «Pravila obsledovaniya nesushchikh stroitel'nykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy» [Tekst]. Vveden 2003-08-21, izd. ofitsial'noye. – M.: Gosstroy Rossii, 2003. – 54 s.
5. Federal'nyy zakon №384 ot 30.12.09 g. «Tekhnicheskiiy reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy».
6. PiN AE-5.6 Normy stroitel'nogo proyektirovaniya AS s reaktorami razlichnogo tipa. – Moskva, 1999.
7. GOST 27751-2014 Nadezhnost' stroitel'nykh konstruktsiy i osnovaniy. Osnov-nyye polozheniya. – Moskva, 2014.
8. SP 22.13330.2011 «Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy» [Tekst]. Vveden 2011-05-20, izd. ofitsial'noye. – M.: Minregion Rossii, 2011. – 161 s.
9. Birbrayer, A. N. Ekstremal'nyye vozdeystviya na sooruzheniya / A. N. Birbrayer, A. YU. Roleder. – SPb. : Izd-vo Politekhn. un-ta, 2009. – 594 s
10. SP 20.13330.2016 "Nagruzki i vozdeystviya" [Tekst]. Vveden 2017-06-04, izd. ofi-tsial'noye. – M.: Minregion Rossii, 2016. – 102 s.

#### V.I. Kolchunov

South West State University, Kursk  
Doctor of Techn. Science, Prof., Head  
of the Unique Buildings and Structures Department  
E-mail: [asiorel@mail.ru](mailto:asiorel@mail.ru)

#### V.V. Potapov

JSC VNIIAES, Moscow  
Candidate of Technical Science,  
Deputy General Director  
E-mail: [vniiaes@vniiaes.ru](mailto:vniiaes@vniiaes.ru)

#### K.O. Dmitrieva

South West State University, Kursk  
Candidate of Technical Science, Senior Lecturer  
of the Industrial and Civil Engineering Department  
E-mail: [dko1988@yandex.ru](mailto:dko1988@yandex.ru)

#### V.A. Iliin

JSC VNIIAES, Moscow  
Head of the department  
E-mail: [vniiaes@vniiaes.ru](mailto:vniiaes@vniiaes.ru)

КОРОБКО А.В., ВЕПРИНЦЕВА Н.В., ШЛЯХОВ С.В.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ МЕМБРАН В ВИДЕ КРУГОВЫХ ЛУНОЧЕК

*В статье рассматривается возможность применения метода интерполяции по коэффициенту формы к определению основной частоты колебаний мембран в виде симметричных и несимметричных круговых луночек. Теоретически показано, что собственное значение дифференциального уравнения колебаний мембран зависит только от коэффициента формы. Приведены примеры выбора «опорных» решений и численно подтверждено, что для всех мембран в виде симметричных и несимметричных круговых луночек можно использовать лишь одну аналитическую зависимость с аргументом в виде коэффициента формы. Исследованы экстремальные свойства луночек в виде симметричных луночек. Доказано, что из всех мембран в виде равновеликих круговых луночек наименьшее значение основной частоты колебаний имеет мембрана в виде симметричной луночки. Мембраны используются в качестве конструктивных элементов мембранных покрытий уникальных зданий и сооружений.*

**Ключевые слова:** симметричные и несимметричные круговые луночки, колебания мембран, метод интерполяции по коэффициенту формы.

Метод интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ) активно развивается в последние годы в Орловском государственном университете им. И.С. Тургенева при исследовании и решении двумерных задач теории упругости и технической теории пластинок [1 - 8]. Теоретические основы этого метода, его геометрическая и физическая сущность подробно изложены в монографии [1]. Его развитием активно занимаются молодые ученые, аспиранты и студенты университета: в работах [2, 3, 4] этот метод применялся к определению максимального прогиба и основной частоты колебаний упругих изотропных пластинок; в статьях [5 - 7] метод получил развитие при расчете пластинок на упругом основании; в статьях [8 - 10] он использовался для решения задач статики и динамики ортотропных пластинок; в статьях [11 - 13] предложено существенное развитие МИКФ, которое заключается в том, что интерполяция опорных решений осуществляется не по коэффициенту формы а по отношению конформных радиусов.

По сравнению с другими приближенными методами решения подобных задач (вариационными методами, МКР, МКЭ) МИКФ позволяет свести решение сложной физической задачи к элементарной геометрической и, что самое главное, дает возможность представлять искомое решение в виде аналитических зависимостей, объединяющих определенные подмножества форм пластинок с различными граничными условиями.

Для более широкого внедрения МИКФ в проектную практику необходимо развивать этот метод применительно к определенным классам форм мембран с учетом их изопериметрических свойств и закономерностей изменения при различных геометрических преобразованиях. Своеобразный класс форм мембран представляют собой фигуры в виде частей круга (секторы, сегменты, луночки, круг с отсеченными частями и т.д.), которые широко используются в качестве конструктивных элементов строительных и машиностроительных конструкций. В представленной статье МИКФ применяется для определения собственной частоты колебаний мембран в виде симметричных и несимметричных круговых луночек.

Рассмотрим дифференциальное уравнение свободных колебаний шарнирно опертых по контуру и равномерно растянутых мембран [14]:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \lambda^2 w, \quad \text{или} \quad \Delta^2 w - \lambda^2 w = 0, \quad (1)$$

где  $\lambda^2 = \omega \sqrt{mA/p}$  – собственное значение дифференциального уравнения (1);  $\omega$  – круговая частота колебаний мембран;  $m$  – масса единицы площади;  $p$  – усилие равномерного растяже-



ния мембраны по контуру;  $A$  – площадь мембраны.. Подставляя в это уравнение функцию прогибов  $w(x,y) = w_0 f(x,y)$ , где  $f(x,y)$  единичная функция, удовлетворяющая условию  $0 \leq f(x,y) \leq 1$ , после преобразований получим:

$$\Delta^2 f + \lambda^2 f = 0.$$

Проинтегрируем правую и левую часть этого уравнения по площади мембраны и запишем соотношение относительно параметра  $\lambda^2$ :

$$\lambda^2 = \frac{\iint_A \Delta^2 f dA}{\iint_A f dA}. \quad (2)$$

Проведя преобразование этого выражения, подставляя в него однопараметрическую функцию прогибов, в работе [1] было получено соотношение

$$\lambda^2 = \frac{K_f}{2A} \int_0^l (g''\rho + g') d\rho \bigg/ \int_0^l g\rho d\rho, \quad (3)$$

где

$$K_f = \oint_L \left( 1 + \frac{(r')^2}{r''} \right) d\varphi$$

Значения определенных интегралов в выражении (3) являются постоянными числами, зависящими от точности выбора функции  $g(\rho)$ . Поэтому их можно внести в эту формулу в виде коэффициента пропорциональности:

$$\lambda^2 \approx K_\lambda K_f / A. \quad (4)$$

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  $g(\rho)$ , которая бы точно удовлетворяла известным решениям.

Выражение (4) показывает, что значение параметра  $\lambda$  функционально зависит от коэффициента формы мембраны (пластинки) и, как показано в работе [1], для ограниченного множества пластинок, связанных одним непрерывным или дискретным геометрическим преобразованием, аппроксимирующую функцию рекомендуется выбирать в виде степенных зависимостей:

$$\lambda^2 = K_\lambda (K_f^n) \frac{P}{Am}; \quad \text{или} \quad \lambda^2 = K_\lambda \sqrt{K_f^2 + C} \frac{P}{Am}. \quad (5)$$

где неизвестные параметры находятся по двум известным (опорным) решениям.

Применим методику МИКФ для подсчета основной частоты колебаний пластинок в виде симметричных и несимметричных круговых луночек.

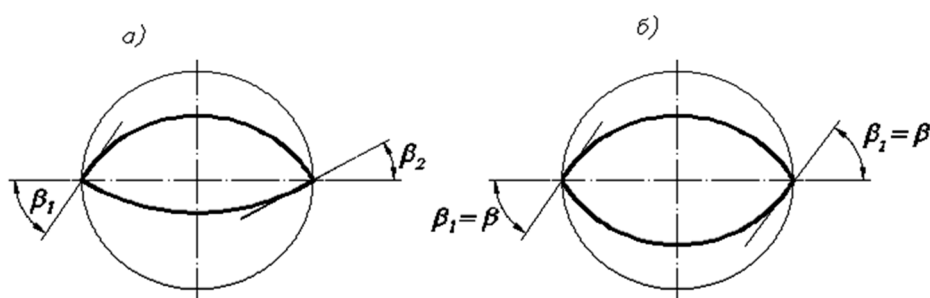


Рисунок 1 – Несимметричные и симметричные круговые луночки

Несимметричные круговые луночки (рисунок 1-а) характеризуются двумя углами  $\beta_1$  и  $\beta_2$  между диаметром круга и касательными, проведенными в углы луночки. При равенстве этих углов ( $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ) луночка становится симметричной (рисунок 1-б).

Несимметричные круговые луночки (рисунок 1-а) характеризуются двумя углами  $\beta_1$  и  $\beta_2$  между диаметром круга и касательными, проведенными в углы луночки. При равенстве этих углов ( $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ) луночка становится симметричной (рисунок 1-б).

Рассмотрим несимметричные луночки, у которых  $\beta_1 = \pi/2$ , а  $\beta_2 \leq \pi/2$  (рисунок 2-б). Для них при использовании МИКФ в качестве опорных фигур можно выбрать круглую мембрану ( $\lambda_1^2 = 18,156 p/(Am)$ ,  $K_{f1} = 2\pi$ ) и полукруглую мембрану ( $\lambda_2^2 = 23,062 p/(Am)$ ,  $K_{f2} = 8,7915$ ).

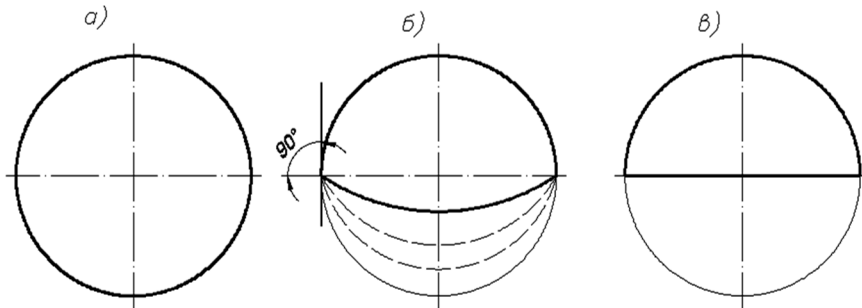


Рисунок 2 – Схема геометрического преобразования мембран

Используя указанные исходные данные и методику МИКФ, получим:

$$\lambda^2 = 4,906 K_f^{0,712} p/(Am), \quad (6) \quad \lambda^2 = 2,313 \sqrt{K_f^2 + 22,162} p/(Am). \quad (7)$$

Симметричные круговые луночки (рисунок 4) можно получить из сегмента (рисунок 3-а), построенного на диаметре заданного круга, путем постепенного добавления других сегментов снизу (см. пунктирные линии на рисунке 3-а). При таком геометрическом преобразовании заданной мембраны в виде сегмента в пределе получится мембрана в виде несимметричной круговой луночки (рисунок 3-в), для определения основной частоты колебаний которой, как было показано выше, можно использовать формулы (6) и (7).

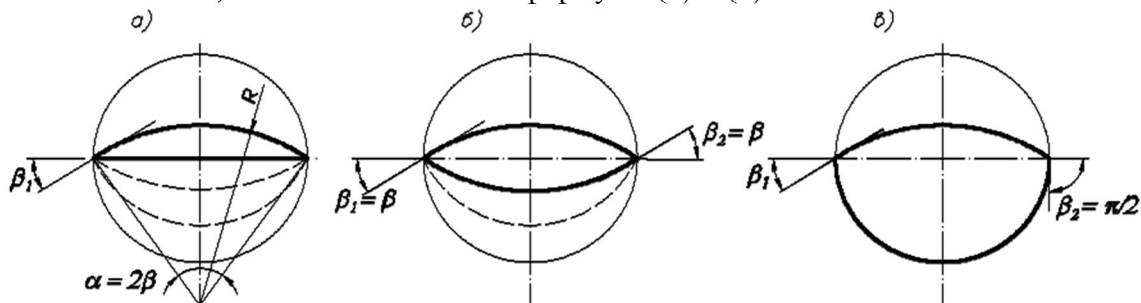


Рисунок 3 – Схема примененного геометрического преобразования

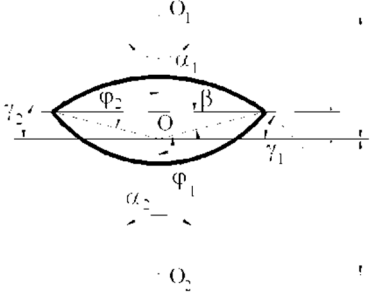
Пусть необходимо определить основную частоту колебаний мембраны в виде симметричной круговой луночки (рисунок 3-б) с углом  $\beta = 60^\circ = \pi/3$  ( $K_f = 7,22552$ ). В качестве первой опорной фигуры выберем сегмент (рисунок 4-а) с параметрами:  $\beta = 60^\circ = \pi/3$  ( $\alpha = 120^\circ = 2\pi/3$ ),  $K_{f1} = 12,7249$  (см. таблицу) и по формуле (7) при  $\alpha = \pi \rightarrow \lambda_1^2 = 31,484 p/(Am)$ . В качестве второй опорной фигуры выберем несимметричную круговую луночку (рисунок 3-в) с параметрами:  $\beta_1 = 60^\circ = \pi/3$ ,  $\beta_2 = 90^\circ = \pi/2$ ,  $K_{f2} = 6,4999$  и  $\lambda_2^2 = 18,602 p/(Am)$ . Используя методику МИКФ, получим:

$$\lambda^2 = 4,297 K_f^{0,783} p/(Am).$$

Подставляя в эту формулу значение коэффициента формы для заданной мембраны, получим:  $\lambda^2 = 20,279 p/(Am)$ . Сопоставим полученное решение с результатами, найденным по формулам (6) и (7) соответственно:  $\lambda^2 = 20,124 p/(Am)$ ,  $\lambda^2 = 20,004 p/(Am)$ . Как видно, все

три решения незначительно отличаются друг от друга. Поэтому в дальнейшем для расчета любой симметричной и несимметричной луночки можно использовать зависимости (6) и (7).

Таблица 1 – Результаты расчета мембран по формуле (7)

 <p>Рисунок 4 – Схема несимметричной круговой луночки</p>				$K_{fa} = \min 2 \left[ \frac{\pi - \arctg(\sin \gamma_1 \operatorname{ctg} \beta)}{\sin \gamma_1} + \frac{\arctg(\sin \gamma_2 \operatorname{ctg} \beta)}{\sin \gamma_2} \right],$ $\operatorname{ctg} \beta = \frac{\sin(\alpha_1 / 2)}{x_0 \cos(\alpha_1 / 2)}, \sin \gamma_1 = \arccos(x_1),$ $\sin \gamma_2 = \operatorname{sinarccos} \left\{ \cos(\alpha_2 / 2) + [\cos(\alpha_1 / 2) - x_0] \frac{\sin(\alpha_2 / 2)}{\sin(\alpha_1 / 2)} \right\}$						
$\beta_1 \backslash \beta_2$	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
90	$\frac{2\pi}{18,159}$									
80	$\frac{6,3071}{18,204}$	$\frac{6,3801}{18,339}$								
70	$\frac{6,3789}{18,337}$	$\frac{6,5043}{18,384}$	$\frac{6,6864}{18,914}$							
60	$\frac{6,4999}{18,563}$	$\frac{6,6832}{18,908}$	$\frac{6,9317}{19,381}$	$\frac{7,2552}{20,004}$						
50	$\frac{6,6734}{18,890}$	$\frac{6,9233}{19,364}$	$\frac{7,2503}{19,995}$	$\frac{7,6690}{20,814}$	$\frac{8,2021}{21,874}$					
40	$\frac{6,9063}{19,332}$	$\frac{7,2353}{19,966}$	$\frac{7,6582}{20,792}$	$\frac{8,1968}{21,863}$	$\frac{8,8847}{23,256}$	$\frac{9,7749}{25,095}$				
30	$\frac{7,2098}{19,916}$	$\frac{7,6362}{20,749}$	$\frac{8,1807}{21,831}$	$\frac{8,8760}{23,239}$	$\frac{9,7731}{25,090}$	$\frac{10,955}{27,579}$	$\frac{12,566}{31,038}$			
20	$\frac{7,6021}{20,682}$	$\frac{8,1530}{21,776}$	$\frac{8,8582}{23,203}$	$\frac{9,7679}{25,080}$	$\frac{10,963}{27,596}$	$\frac{12,582}{21,072}$	$\frac{14,878}{36,094}$	$\frac{18,371}{43,865}$		
10	$\frac{8,1126}{21,695}$	$\frac{8,8305}{23,146}$	$\frac{9,7590}{25,061}$	$\frac{10,980}{27,632}$	$\frac{12,632}{31,181}$	$\frac{14,965}{36,286}$	$\frac{18,480}{44,109}$	$\frac{24,352}{57,369}$	$\frac{36,183}{84,397}$	
0	$\frac{8,7915}{23,066}$	$\frac{9,7468}{25,036}$	$\frac{11,009}{27,694}$	$\frac{12,725}{31,382}$	$\frac{15,158}{36,712}$	$\frac{18,842}{44,921}$	$\frac{25,019}{58,884}$	$\frac{37,421}{87,237}$	$\frac{54,717}{127,03}$	$\frac{\infty}{0}$
<p><b>Примечания:</b></p> <p>1 В числителе находятся значения коэффициента формы мембран, а в знаменателе – основная частота колебаний.</p> <p>2 В колонке 2 находятся результаты для мембран в виде несимметричных луночек, у которых <math>\beta_1 = \pi/2</math> и <math>\beta_2 &lt; \pi/2</math>; по нисходящей диагонали – результаты для симметричных луночек.</p> <p>3. Ниже жирной линии расположены сомнительные результаты из-за наличия сильно острых углов.</p>										

Рассмотрим мембрану в виде полукруга и применим к ней операцию симметризации Штейнера относительно диаметра (рисунок 5). При этом полукруг преобразуется в симметричную круговую луночку. В соответствии с теоремой о симметризации, сформулированной в работе [11], основная частота колебаний полученной мембраны будет меньше, чем частота колебаний полукруглой мембраны. Доказать это утверждение можно, подсчитав значение коэффициента формы для полученной фигуры и сопоставив его с  $K_f$  для полукруга, поскольку и для одной и для другой мембраны основная частота определяется по одной и той же формуле (6) или (7).

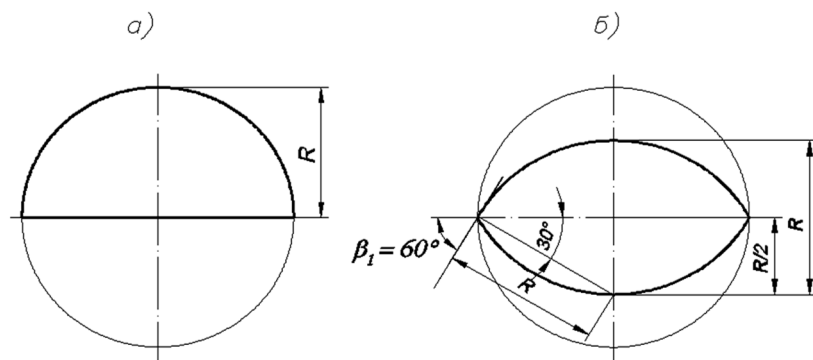


Рисунок 5 – Симметризация полукруга

При симметризации Штейнера ширина фигуры и площадь остаются постоянными, поэтому из геометрических соображений (рисунок 5) нетрудно подсчитать, что полученная при этом симметричная круговая луночка будет иметь угол  $\beta = 60^\circ$ . Для нее  $K_f = 2\pi/\sin 60^\circ = 7,2552$ , что существенно меньше  $K_f = 8,7915$  для полукруга. Таким образом, из всех равновеликих мембран в виде круговой луночки наименьшее значение основной частоты колебаний имеет симметричная луночка.

### Выводы

1 Для построения аппроксимирующих функций, для мембран в виде симметричных и несимметричных круговых луночек использовались зависимости вида

$$\lambda^2 = K_\omega (K_f)^n p/(Am) \quad \text{и} \quad \lambda^2 K_\omega \sqrt{K_f^2 + B} p/(Am).$$

По обеим формулам получаются результаты, практически не отличающиеся друг от друга.

2 Получены решения для подмножества мембран в виде симметричных и несимметричных круговых луночек

3 Установлены экстремальные свойства основной частоты колебаний мембран в виде симметричных круговых луночек: из всех равновеликих мембран в виде круговой луночки наименьшее значение основной частоты колебаний имеет симметричная луночка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: Изд-во АСВ стран СНГ, 1999. – 320 с.
2. Поля, Г. Изопериметрические неравенства в математической физике: Пер. с англ. Изд. 2-е, стереотипное [Текст] / Г. Поля, Г. Сеге. – М.: КомКнига, 2006. – 336 с.
3. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки. Пер. с англ. Изд. 2-е, стереотипное [Текст] / С.П. Тимошенко, С. Войновский - Кригер. – М.: Изд-во Наука, 1966. – 636 с.
4. Савин, С.Ю. Изгиб ортотропных пластинок в виде прямоугольных треугольников с однородными и комбинированными граничными условиями / С.Ю. Савин // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы международных академических чтений РААСН. – Курск: КурскГУ. – 2011. – С. 161-170.
5. Коробко, В.И. Расчет треугольных ортотропных пластинок с однородными граничными условиями методом интерполяции по коэффициенту формы / В.И. Коробко, С.Ю. Савин // Строительство и реконструкция. – 2010. – № 4. – С. 8-12.
6. Коробко, А.В. Программа определения максимального прогиба упругих ортотропных пластинок на основе метода интерполяции по коэффициенту формы / А.В. Коробко, М.Ю. Прокуров, С.Ю. Савин // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 12. – С. 35-41.

7. Коробко, В.И. Определение основной частоты колебаний пластинок на упругом основании методом интерполяции по коэффициенту формы [Текст] / В.И. Коробко, А.А. Актуганов // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений. – Курск: Курск. гос. ун-т, 2011. – С.89–96.
8. Коробко, В.И. Определение основной частоты колебаний пластинок на упругом основании с двумя коэффициентами постели методом интерполяции по коэффициенту формы [Текст] / В.И. Коробко, А.А. Актуганов // Проблемы оптимального проектирования сооружений: Доклады 3-й Всероссийской конференции, Новосибирск, 15 – 17 апреля, 2014 г. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2014. – С. 207–214.
9. Черняев, А.А. Геометрическое моделирование пластинчатых конструкций из условия жесткости / А.А. Черняев // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering / Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. – 2012. – Volume 8, Issue 4. – Pp. 66-77.
10. Черняев, А.А. К вопросу о расчете пластинок средней толщины из условия жесткости / А.А. Черняев // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – №1. – С. 83-89.
11. Коробко, В.И. Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода. – Т. 1 [Текст] / В.И. Коробко. – М.: Издательство АСВ, 1997. – 390 с.

**Коробко Андрей Викторович**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика и инженерная графика»  
Тел.: +7 (4862) 73-43-49  
E-mail: [ankor-66@mail.ru](mailto:ankor-66@mail.ru)

**Вепринцева Надежда Викторовна**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Студентка магистратуры кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
Тел.: +7 (4862) 73-43-49  
E-mail: [veprintseva.nadejda@yandex.ru](mailto:veprintseva.nadejda@yandex.ru)

**Шляхов Станислав Владимирович**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел  
аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
Тел.: +7 (4862) 73-43-49  
E-mail: [shlyakhov.stas@mail.ru](mailto:shlyakhov.stas@mail.ru)

---

A.V. KOROBKO, N.V. VEPRINTSEVA, S.V. SHLYAKOV

## DETERMINATION OF THE MEMBRANES FUNDAMENTAL FREQUENCY OF OSCILLATIONS CIRCULAR LUNETTES

*The article considers the possibility of applying the method of interpolation by the shape factor to the determination of the membranes fundamental frequency of oscillation in the form of symmetrical and nonsymmetrical circular lunettes. Theoretically shown, that the eigenvalue of the differential equation of membranes depends only on the form factor. Given examples of choice "support" solutions and it's numerically confirmed, that for all membranes in the form of symmetric and asymmetrical circular lunettes can use only an analytical dependence on the argument as a form factor. Extreme properties of the lunettes in the form of symmetrical lunettes were studied. It is proved that from all membranes in the form of equal circular lunettes the smallest value of the fundamental frequency of oscillations has a membrane in the form of symmetrical lunettes.*

**Key words:** *symmetric and asymmetrical circular lunettes, oscillations of membranes, method of interpolation by the shape factor.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Korobko A.V. Geometricheskoe modelirovanie formy oblasti v dvumernyh zadachah teorii uprugosti [Tekst] / – М.: Izd-vo ASV stran SNG, 1999. – 320 s.
2. Polia, G. Izoperimetricheskie neravenstva v matematicheskoy fizike: per. s angl. izd. 2-e, stereotipnoe [Tekst] / G. Polia, G. Sege. – М.: Komkniga, 2006. – 336 s.

3. Timoshenko, S.P. Plastinki i obolochki. per. s angl. Izd. 2-e, stereotipnoe –[Tekst] / S.P. Timoshenko, S. Vojnovskij-Kruger. – M.: Izd-vo nauka, 1966. – 636 s.
4. Savin, S.U. Izgib ortotropnyh plastinok v vide pryamougolnyh treugolnikov s odnorodnymi i kombinirovannymi granichnymi usloviyami [Tekst] / S.U. Savin // Bezopasnost stroitelnogo fonda rossii. problemy i resheniya: Materialy mezhdunarodnyh akademi-cheskikh chtenij RAASN. – Kursk: Kursk gu. –2011. – s. 161-170.
5. Korobko, V.I. Raschet treugolnyh ortotropnyh plastinok s odnorodnymi granichnymi usloviyami metodom interpolyatsii po koeffficientu formy / V.I. Korobko, S.U. Savin // Stroitelstvo i rekonstrukciya. – 2010. – № 4. –s. 8-12.
6. Korobko, A.V. Programma opredeleniya maksimalnogo progiba uprugih ortotropnyh plastinok na osnove metoda interpolyatsii po koeffficientu formy –[Tekst] / A.V. Korobko, M.U. Prokurov, S.U. Savin // Stroitelstvo i rekonstrukciya. –2012. – № 12. – s. 35-41.
7. Korobko, V.I. Opredelenie osnovnoj chastoty kolebanij plastinok na uprugom osnovanii metodom interpolyatsii po koeffficientu formy V [Tekst] / V.I. Korobko, A. A. Aktuganov // Bezopasnost stroitelnogo fonda rossii. problemy i resheniya: materialy mezhdunarodnyh akademicheskikh chtenij. – Kursk: Kursk. gos. un-t, 2011. – s.89–96.
8. Korobko, V.I. Opredelenie osnovnoj chastoty kolebanij plastinok na uprugom osnovanii s dvumya koeffficientami posteli metodom interpolyatsii po koeffficientu formy [Tekst] / V.I. Korobko, A.A. Aktuganov // Problemy optimalnogo proektirovaniya sooruzhenij: doklady 3-j vsrossijskoj konferencii, Novosibirsk, 15 – 17 aprelya, 2014 g. – Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2014. – s. 207–214.
9. Chernyaev, A.A. Geometricheskoe modelirovanie plastinchatyh konstrukcij iz usloviya zhestkosti [Tekst] / A.A. Chernyaev // international journal for computational civiland structural engineering / Mezhdunarodnyj zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitelnyh konstrukcij. – 2012. – volume 8, issue 4. – pp. 66-77.
10. Chernyaev, A.A. K voprosu o raschete plastinok srednej tolshhiny iz usloviya zhestkosti [Tekst] / A.A. Chernyaev // Regionalnaya arhitektura i stroitelstvo. – 2012. – №1. – s. 83-89.
11. Korobko, V.I. Izoperimetricheskij metod v stroitelnoj mehanike: teoreticheskie osnovy izoperimetricheskogo metoda. – T. 1 –[Tekst] / V.I. Korobko. – M.: Izdatelstvo ASV, 1997. – 390 s.

**A.V. Korobko**

Orel State University named after I.S. Turgenev

Doctor of Sciences, Professor of the Department «Technical Mechanics and Engineering Graphics»

Ph.: +7 (4862) 43-58-94

E-mail: [ankor\\_66@mail.ru](mailto:ankor_66@mail.ru)

**N.V.Veprintseva**

Orel State University named after I.S. Turgenev

Graduate Student of the Department «Building designs and materials»

Тел.: +7 (4862) 73-43-49

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

**S.V. Shlyakhov**

Orel State University named after I.S. Turgenev

Graduate Student of the Department «Building designs and materials»

Ph.: +7 (4862) 73-43-49

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



КУРНАВИНА С.О., КОЛГАНОВ А.А.

## ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ КОНСОЛЬНОЙ МОДЕЛИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ РАСЧЕТА КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

В рамках спектральной теории сейсмостойкости оценивается применимость упрощенной модели каркасного здания в виде консольного стержня с распределенной массой, учитывающей влияние перекрытий на собственные частоты колебаний. В качестве эталонной модели рассматривается поперечная рама каркасного здания. Оценивается влияние различных факторов на точность вычисления собственных частот с использованием упрощенной модели. Предложена формула, позволяющая в рамках данной модели учесть податливость стыка ригеля с колонны в сборных каркасах на основе энергетического принципа Рэлея.

**Ключевые слова:** сейсмические воздействия, упрощенная консольная модель, вариационный принцип.

Наиболее трудоемким этапом расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия является определение частот их собственных колебаний. От их значений зависит значение коэффициента динамичности и величина сейсмических сил, действующих на здание [4-8].

В современных Российских нормах по сейсмостойкому строительству при определении расчетных сейсмических нагрузок на здания и сооружения рекомендуется принимать пространственные расчетные динамические модели конструкций. Однако для простых в плане сооружений, удовлетворяющим требованиям примечания к п. 5.3 [1], расчетные сейсмические нагрузки допускается определять на основе консольной расчетной динамической модели (рис. 1 а), в которой массы этажей сосредоточены в уровне перекрытий.

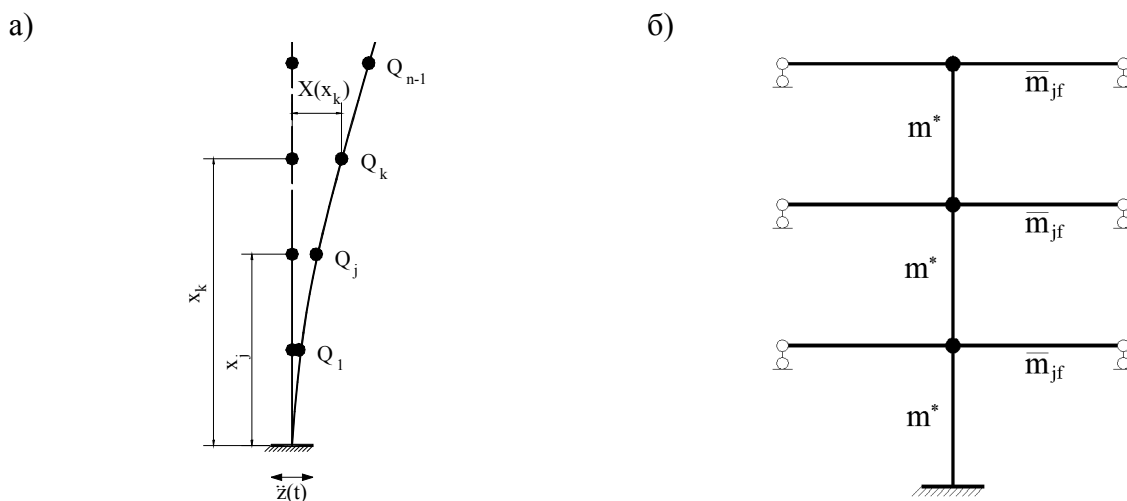


Рисунок 1 – Консольная расчетная модель многоэтажных зданий: а – невесомая консоль с сосредоточенными массами, б – консоль с распределенной массой стоек и сосредоточенными массами этажей

В [2] для зданий с рамными каркасами предложена усовершенствованная консольная модель, учитывающая распределенную массу вертикальных несущих конструкций (стоек)  $m^*$  и влияние ригелей на колебания рамы (рис. 1б). При определении собственных частот расчет-

ная схема здания сводится к консольному стержню с распределенной массой, несущего сосредоточенные массы в уровне перекрытий. Данная модель учитывает потенциальную энергию изгиба ригелей. При этом углы поворота консоли и ригеля полагаются равными.

В модели с распределенной массой стойки и с учетом изгиба перекрытий для определения высших собственных частот и собственных форм служит расширенный вариационный принцип Рэлея, согласно которому собственная частота  $\omega_i$  удовлетворяет соотношению

$$\omega_i^2 = \min \frac{\Pi_0(F_i)}{K_0(F_i)}, \quad (1)$$

где  $\Pi_0$  – потенциальная,  $K_0$  – кинетическая энергия колебаний консоли.

При определении  $\omega_i$  и  $F_i$  форма колебаний  $F_i$  должна быть ортогональна ко всем низшим формам колебаний. Форма  $F_i(x)$  задается точно или приближенно и должна удовлетворять граничным условиям. Точное выражение формы дает точное значение частот.

Приращение кинетической энергии колебаний консоли с распределенными параметрами за промежутки времени  $dt$ :

$$d_t K_1 = m^* \cdot \ddot{Y}_i \cdot d_t Y_i \cdot \int_0^l F_i^2(x) dx, \quad (2)$$

где  $y_i(x, t) = Y_i(t) \cdot F_i(x)$  – перемещение консоли. Форма колебаний консоли  $F_i(x)$  задается при помощи функций Крылова.

Аналогично определяется выражение для приращения кинетической энергии при движении перекрытия как сосредоточенной массы  $m_j = \sum_{f=1}^d \bar{l}_f \cdot \bar{m}_{jf}$  (черта означает, что рассматриваемая величина относится к перекрытию), вдоль оси  $\bar{x}_j$ .

$$d_t(K_2(m_j)) = \sum_{j=1}^k m_j \cdot \ddot{Y}_i \cdot d_t Y_i \cdot F_i^2(x_j) = \sum_{j=1}^k \left( \sum_{f=1}^d \bar{l}_f \cdot \bar{m}_{jf} \right) \cdot \ddot{Y}_i \cdot d_t Y_i \cdot F_i^2(x_j), \quad (3)$$

$d$  – количество пролетов,  $\bar{m}_{jf}$  – погонная масса ригеля,  $\bar{l}_f$  – пролет ригеля.

Кинетическая энергия поперечных колебаний междуэтажных перекрытий  $j$ -ого этажа

$$d_t(K_3(\bar{m}_j)) = \sum_{j=1}^k \sum_{f=1}^d \bar{m}_{jf} \cdot \ddot{Y}_{jif} \cdot d_t \bar{Y}_{jif} \cdot \int_{-\frac{\bar{l}_{f-1}}{2}}^{\frac{\bar{l}_f}{2}} \bar{F}_i(\bar{x}_j) d\bar{x}, \quad (4)$$

где  $\bar{F}_i(\bar{x})$  – форма изогнутой оси ригеля, соответствующая  $i$ -ой форме колебаний консоли,  $k$  – количество перекрытий.

Приращение потенциальной энергии изгиба консоли:

$$d_t \Pi_1 = B^* \cdot Y_i \cdot d_t Y_i \cdot \int_0^l \left( F_i''(x) \right)^2 dx, \quad (5)$$

$B^*$  – жесткость консоли.

Приращение потенциальной энергии изгиба ригелей:

$$d_t \Pi_2 = \sum_{j=1}^k \sum_{f=1}^d \bar{B}_{jf} \cdot \bar{Y}_{jif} \cdot d_t \bar{Y}_{jif} \cdot \int_{-\frac{\bar{l}_{f-1}}{2}}^{\frac{\bar{l}_f}{2}} \left( \bar{F}_i''(\bar{x}_j) \right)^2 dx \quad (6)$$

Форму изгиба ригелей можно аппроксимировать статической кривой изгиба под действием сосредоточенных моментов, вызванных поворотом стоек.

Подставив выражения (2)-(6) в уравнение энергетического баланса и поделив на  $d_i Y_i$ , получаем дифференциальное уравнение движения консоли.

Эквивалентная жесткость консоли при одинаковых пролетах и размерах сечения ригелей равна:

$$B_i = B^* \cdot \left( 1 + d \cdot \frac{48}{(\alpha_i \cdot l)^2 \cdot H_i} \cdot \frac{l}{\bar{l}} \cdot \frac{\bar{B}}{B^*} \cdot \sum_{j=1}^k D_1^2(\alpha_i \cdot x_j) \right). \quad (7)$$

Эквивалентная масса консоли:

$$m = m^* \cdot \left( 1 + d \cdot \frac{4}{H_i} \cdot \frac{\bar{l}_f}{l} \cdot \sum_{j=1}^k \left( \frac{\bar{m}_j}{m^*} \cdot D^2(\alpha_i \cdot x_j) + \right. \right. \\ \left. \left. + d \cdot \frac{0.0190476}{H_i} \cdot \left( \frac{\bar{l}_f}{l_i} \right)^3 \cdot \sum_{j=1}^k \frac{\bar{m}_j}{m^*} \cdot D_1^2(\alpha_i \cdot x_j) \right) \right), \quad (8)$$

где  $D_{i,j}(\alpha_i \cdot x_j)$  - функция формы консольного стержня, а  $D_1(\alpha_i \cdot x_j)$  - ее первая производная по координате.

В случае использования сборных конструкций данная формула может быть модифицирована путем введения опорных участков ригелей с пониженной жесткостью, моделирующих податливость сборных узлов сопряжения ригеля с колонной при действии изгибающих моментов в плоскости рамы [3]. Пусть длина такого участка равна  $\bar{l}_{duct}$ , а жесткость  $\bar{B}_{duct}$ . В этом случае выражение для потенциальной энергии изгиба ригеля (формула (6)) разобьется на 2 слагаемых:

$$d_i \Pi_2 = \sum_{j=1}^k \sum_{f=1}^d \left( 2 \cdot \bar{B}_{jf} \cdot \bar{Y}_{jif} \cdot d_t \bar{Y}_{jif} \cdot \int_{\bar{l}_{duct}}^{\frac{\bar{l}_f}{2}} \left( \bar{F}_i''(\bar{x}_j) \right)^2 dx + \right. \\ \left. + 2 \cdot \bar{B}_{duct} \cdot \bar{Y}_{jif} \cdot d_t \bar{Y}_{jif} \cdot \int_0^{\bar{l}_{duct}} \left( \bar{F}_i''(\bar{x}_j) \right)^2 dx \right). \quad (9)$$

Тогда приведенная жесткость консоли

$$B_i = B^* \cdot \left( 1 + d \cdot \frac{48}{(\alpha_i \cdot l)^2 \cdot H_i} \cdot \frac{l}{\bar{l}} \cdot \frac{\bar{B}}{B^*} \cdot \sum_{j=1}^k D_1^2(\alpha_i \cdot x_j) \cdot \left[ 1 + 6 \cdot \left( \frac{\bar{B}_{duct}}{\bar{B}_{jf}} - 1 \right) \cdot \left( \frac{\bar{l}_{duct}}{\bar{l}_f} - 2 \cdot \left( \frac{\bar{l}_{duct}}{\bar{l}_f} \right)^2 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{\bar{l}_{duct}}{\bar{l}_f} \right)^3 \right) \right] \right). \quad (10)$$

Более точным является выражение для эквивалентной жесткости, учитывающее взаимное влияние изгиба стоек и перекрытий рамы (влияние сопутствующих форм колебаний):

$$B_i = B^* \cdot \left( 1 + \frac{144 \cdot (d+1)}{(\alpha_i \cdot l)^2} \cdot \left( \frac{\bar{B}}{B^*} \right)^2 \cdot \left( \frac{l}{\bar{l}} \right)^2 \cdot \sum_{j=1}^k D_{1ij}^2 \cdot \frac{\Delta_{jf}^2 \cdot \int_0^S \Phi_C^2 dx}{l} \right. \\ \left. + d \cdot \frac{48}{(\alpha_i \cdot l)^2} \cdot \frac{l}{\bar{l}} \cdot \frac{\bar{B}}{B^*} \cdot \sum_{j=1}^k D_{1ij}^2 \cdot (1 - \Delta_{jf}^2) \right). \quad (11)$$

где  $\Phi_C(x)$  – форма эпюры моментов от изгиба стойки по сопутствующей форме на рассматриваемом участке протяженностью  $S$ .

Собственная частота колебаний поперечной рамы каркаса:

$$\omega_i = \frac{(\alpha_i \cdot l)^4}{l^4} \cdot \frac{B_i}{m_i}. \quad (12)$$

Для оценки применимости формулы (12) для практических расчетов каркасных зданий проведено сравнение собственных частот, вычисленных на основе консольной модели, с частотами собственных колебаний рамы с распределенными параметрами. По результатам вычислений строились графики отношения частот консольной модели к частотам собственных колебаний рамы в зависимости от соотношения жесткостей ригеля стойки  $\bar{B}/B^*$ .

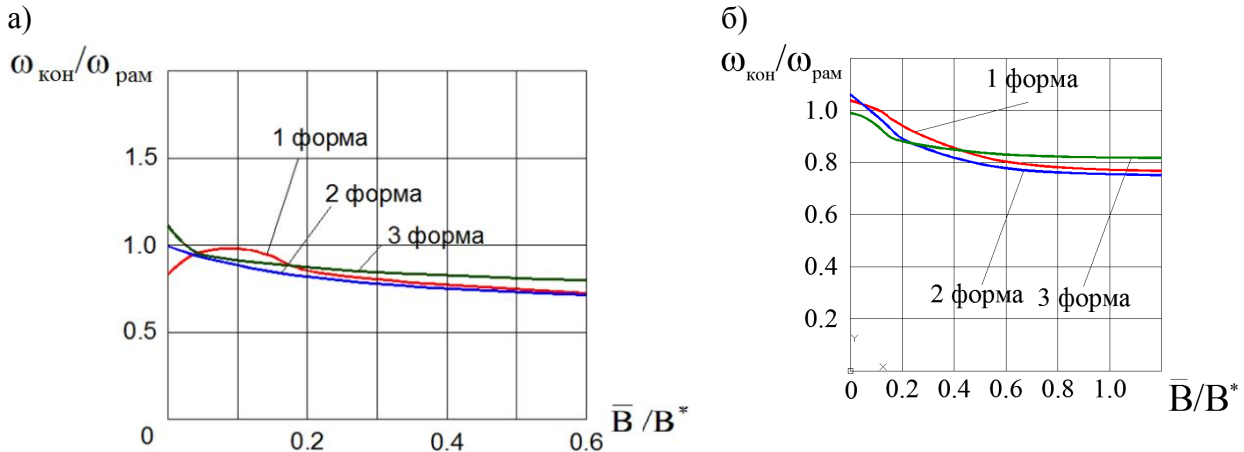


Рисунок 2 - График зависимости отношения частот от относительной жесткости перекрытия: а - для пятиэтажной рамы, б - для трехэтажной рамы

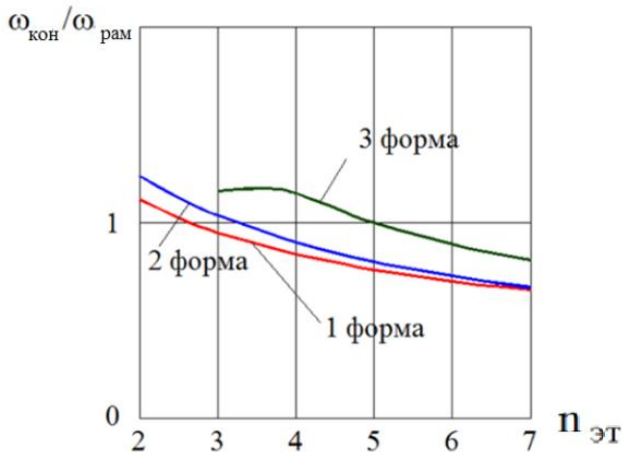


Рисунок 3 - Зависимость отношения частот от этажности здания

той этажа 3 м. Учитывались первые три формы собственных колебаний, а этажность рамы варьировалась от 2 до 7 этажей.

Как показали результаты расчетов, в целом выражение на основе формулы Рэлея дает более низкие значения собственных частот по сравнению с частотами колебаний рамы. Величина отклонения возрастает с увеличением относительной жесткости перекрытий. Этот факт можно объяснить искажающим влиянием перекрытий на формы колебаний консоли (в пределах каждого этажа), что приводит к увеличению потенциальной энергии системы и не учтено при выборе форм  $F(\alpha_i)$  в формуле Рэлея. Этой же причиной может быть обусловлено увеличение погрешности с повышением этажности здания, а следовательно, и числа перекрытий.

На рис. 2 а. представлен график для пятиэтажной двухпролетной рамы. Величина пролетов - 6 м, высота этажей - 4.8 м. Соотношение жесткости ригелей и суммарной жесткости стоек варьировалось от 0 до 0.54. На рис. 2 б представлен аналогичный график для трехэтажной двухпролетной рамы с высотой этажа 4.5 м, пролетом – 12 м. Соотношение жесткостей ригеля и стойки изменялось в пределах от 0.1 до 1.2.

Также построена зависимость отношения частот консольной модели и рамы от этажности здания (рис. 3) для двухпролетной рамы пролетом 6 м с высо-

На основе полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Формула для определения собственных частот на основе консольной модели с учетом влияния перекрытий дает удовлетворительные результаты для практических расчетов каркасных зданий.
2. При небольшой относительной жесткости перекрытий значения частот колебаний рамы и консоли сближаются.
3. Значения частот по формуле Рэлея несколько занижены по сравнению с частотами колебаний рамы.
4. Учет влияния перекрытий на изгиб стоек в пределах этажа позволяет сблизить значения частот колебаний консоли и рамы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах, актуализированная редакция СНиП II-7-81\*»: издание официальное. - Москва, 2011 г.
2. Жарницкий, В.И. Сейсмический расчет зданий по схеме консоли с распределенными параметрами [Текст]: учебное пособие / В.И. Жарницкий, С.О. Курнавина. - М., 2003.
3. Рекомендации по расчету каркасов многоэтажных зданий с учетом податливости узловых сопряжений зданий с учетом податливости узловых сопряжений сборных железобетонных конструкций. - М.: ЦНИИ-Промзданий, 2002 г.
4. Жарницкий, В.И. Использование  $\sigma$ - $\epsilon$  метода для описания процесса развития повреждений в раме при сейсмических воздействиях [Текст] / В.И. Жарницкий, Ю.Л. Голда, С.О. Курнавина // Строительство и реконструкция. - 2014. - № 6.
5. Жарницкий, В.И. Развитие повреждений в железобетонной раме при сейсмических воздействиях [Текст] / В.И. Жарницкий, Ю.Л. Голда, С.О. Курнавина // Материалы III Всероссийской конференции по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – взгляд в будущее», 2014 г. – М., 2014.
6. Жарницкий, В.И. Поперечные колебания сооружения с учетом вертикальной нагрузки от собственного веса [Текст] / В.И. Жарницкий, Ш.Ш. Шарипов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2013. - № 3.
7. Rybak, J. Calibration of rapid impulse compaction on the basis of vibration velocity control / J. Rybak, A.G. Tamrazyan // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 16, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Сер. "16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2016: Ecology, Economics, Education and Legislation - Conference Proceedings". - 2016. - pp. 715-722.
8. Ковальчук, О.А. Уравнение состояния стержневых элементов конструкций зданий [Текст] / О.А. Ковальчук, А.Г. Тамразян // Вестник гражданских инженеров. - 2016. - № 6 (59). - С. 102-108.

**Курнавина Софья Олеговна**

ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», г. Москва

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции»

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

**Колганов А.А.**

ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», г. Москва

Магистр кафедры «Железобетонные и каменные конструкции»

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

---

S.O. KURNAVINA, A.A. KOLGANOVA

### EVALUATION OF APPLICABILITY OF A CANTILEVER WITH DISTRIBUTED PARAMETERS AS A DESIGN MODEL OF REINFORCED CONCRETE FRAMES UNDER SEISMIC LOADS

*Within the spectral theory of seismic resistance the applicability of a simple model of reinforced concrete frame, considered as a cantilever bar with distributed mass and taking into account the influence of floors. A reinforced concrete frame is used as a standard. The influence of different factors on the*

*accuracy of natural frequency estimation on a basis of simple model is evaluated. The expression is offered, enabling to take into account the increase of beam-to-column joints flexibility in prefabricated frames on a basis of energy concept of Rayleigh.*

**Key words:** seismic actions, simplified cantilever model, variational principle.

## BIBLIOGRAPHY

1. SP 14.13330.2011 «Stroitel'stvo v seysmicheskikh rayonakh, aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-7-81\*»: izdaniye ofitsial'noye. - Moskva, 2011 g.
2. Zharnitskiy, V.I. Seysmicheskiy raschet zdaniy po skheme konsoli s raspredelennymi paramet-rami [Tekst]: uchebnoye posobiye / V.I. Zharnitskiy, S.O. Kurnavina. - M., 2003.
3. Rekomendatsii po raschetu karkasov mnogoetazhnykh zdaniy s uchetom podatlivosti uzlovykh so-pryazheniy zdaniy s uchetom podatlivosti uzlovykh sopryazheniy sbornykh zhelezobetonnykh konstruksiy. - M.: TSNIIPromzdaniy, 2002 g.
4. Zharnitskiy, V.I. Ispol'zovaniye  $\sigma$ - $\epsilon$  metoda dlya opisaniya protsessa razvitiya povrezhdeniy v rame pri seysmicheskikh vozdeystviyakh [Tekst] / V.I. Zharnitskiy, YU.L. Golda, S.O. Kurnavina // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. - 2014. - № 6.
5. Zharnitskiy, V.I. Razvitiye povrezhdeniy v zhelezobetonnoy rame pri seysmicheskikh vozdeystvi-yakh [Tekst] / V.I. Zharnitskiy, YU.L. Golda, S.O. Kurnavina // Materialy III Vserossiyskoy konferentsii po betonu i zhelezo-betonu «Beton i zhelezobeton – vzglyad v budushcheye», 2014 g. – M., 2014.
6. Zharnitskiy, V.I. Poperechnyye kolebaniya sooruzheniya s uchetom vertikal'noy nagruzki ot sob-stvennogo vesa [Tekst] / V.I. Zharnitskiy, SH.SH. Sharipov // Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy. - 2013. - № 3.
7. Rybak, J. Salibration of rapid impulse compaction on the basis of vibration velocity control / J. Rybak, A.G. Tamrazyan // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Sur-veying Geology and Min-ing Ecology Man-agement, SGEM 16, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Ser. "16th International Multidisci-plinary Scientific GeoConference, SGEM 2016: Ecology, Economics, Education and Legis-lation - Conference Proceed-ings". - 2016. - pp. 715-722.
8. Koval'chuk, O.A. Uravneniye sostoyaniya sterzhnevyykh elementov konstruksiy zdaniy [Tekst] / O.A. Ko-val'chuk, A.G. Tamrazyan // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. - 2016. - № 6 (59). - S. 102-108.

### S.O. Kurnavina

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

Candidate of Techn. Science, Associated Prof. of the Reinforced Conrete and Masonry Structures Department

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

### A.A. Kolganova

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

Master Student of the Reinforced Conrete and Masonry Structures Department

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



ПЛЕВКОВ В.С., САРКИСОВ Д.Ю., БАЛДИН С.В.

## АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ НЕСУЩЕГО КАРКАСА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ

*В работе представлены результаты исследований параметров колебательных процессов строительных конструкций несущего каркаса здания подготовительного отделения завода «Бунге СНГ» в с. Колодезном Воронежской области. Описаны подходы к решению проблемы чрезмерных колебаний элементов несущего металлического каркаса. Проанализированы данные зарегистрированных замеров на объекте специальными приборами – Вибран 2.2 и многоканальной измерительной системой. Описана методика проведения замеров, схемы расстановки датчиков ускорения. Оценены частоты колебаний, представлены результаты спектрального анализа. Выявлены основные причины чрезмерных колебаний элементов каркаса здания и установлены типы оборудования, которое оказывает максимальное влияние на вибрации строительных конструкций на объекте. Выполнены численные статические и динамические расчеты, произведена оценка несущей способности с использованием оригинально методики на основе поверхностей относительного сопротивления, даны рекомендации по уменьшению производственной вибрации.*

**Ключевые слова:** колебания, вибрация, частота колебаний, виброскорость, виброускорение, поверхность относительного сопротивления.

При эксплуатации производственных зданий, насыщенных технологическим оборудованием, часто возникает необходимость в оценке параметров колебательных процессов (вибрации) несущего каркаса. Связано это не только с тем, что внедрение виброактивной техники во все отрасли привело к значительному возрастанию профессиональных рисков развития вибрационной профпатологии, но и с возможной опасностью разрушения узлов сопряжения несущих конструкций каркасов зданий вследствие негативного воздействия вибрации. Поэтому вопросы оценки параметров колебаний и их влияния на несущие каркасы зданий на современном этапе развития промышленного производства являются актуальными и приобретают все большее практическое значение [1-3].

В настоящей работе представлены результаты выполненных исследований параметров колебательных процессов несущих конструкций каркаса здания подготовительного отделения завода «Бунге СНГ» в с. Колодезном Воронежской области. Предметом исследований являлись колебательные процессы в элементах несущего металлического каркаса здания, вызванные работой технологического оборудования: сепараторов, семенорушек, вентиляторов аспирации, грануляторов шрота и т.д.

Здание выполнено трехэтажным с несущим металлическим каркасом, размерами в осях «А-Д, 1-15» 24,0\*84,0 м. Общая высота здания в коньке составляет 24,86 м. Отметка перекрытия над первым этажом +6,500 м, отметка перекрытия над вторым этажом +13,700 м, отметка низа стропильных конструкций +20,850 м. Несущие металлические колонны каркаса выполнены из колонных металлических двутавров 35К1 и 35К2. Для главных балок в основном применены металлические широкополочные двутавры 35Ш1, для второстепенных балок – 20Ш1. В местах установки тяжелого технологического оборудования установлены балки другого сечения. Полы первого этажа выполнены бетонными, на втором и третьем этажах применены стальные просечно-вытяжные листы. Стропильные конструкции – металлические треугольные фермы пролетом 24,0 м, выполненные из спаренных уголков различного сечения. Общие виды представлены на рис. 1.



*Рисунок 1 – Общие виды здания подготовительного отделения*

Основной задачей исследований являлось установление причин повышенных амплитуд колебаний металлических колонн каркаса и взаимосвязи частот их колебаний с частотами колебаний технологического оборудования. В дальнейшем необходимо было найти решения данной проблемы и исключить возможные резонансные явления с возникновением повышенных амплитуд колебаний, разрушений строительных конструкций и их узлов сопряжения.

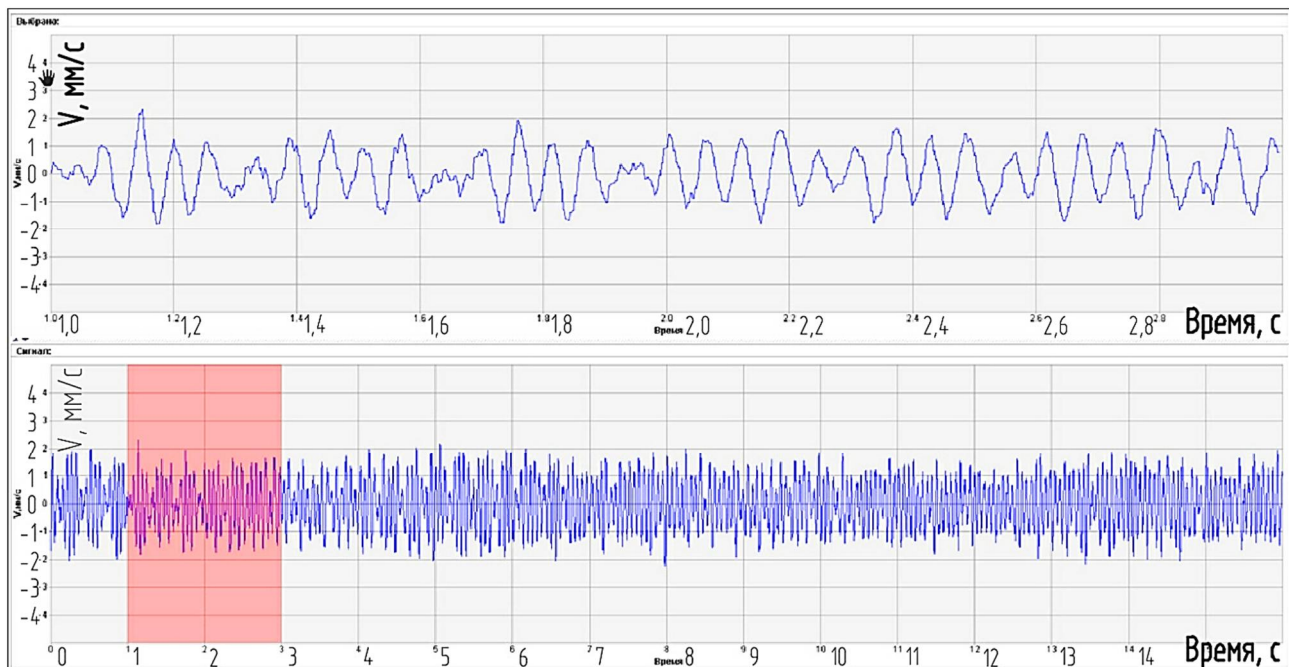
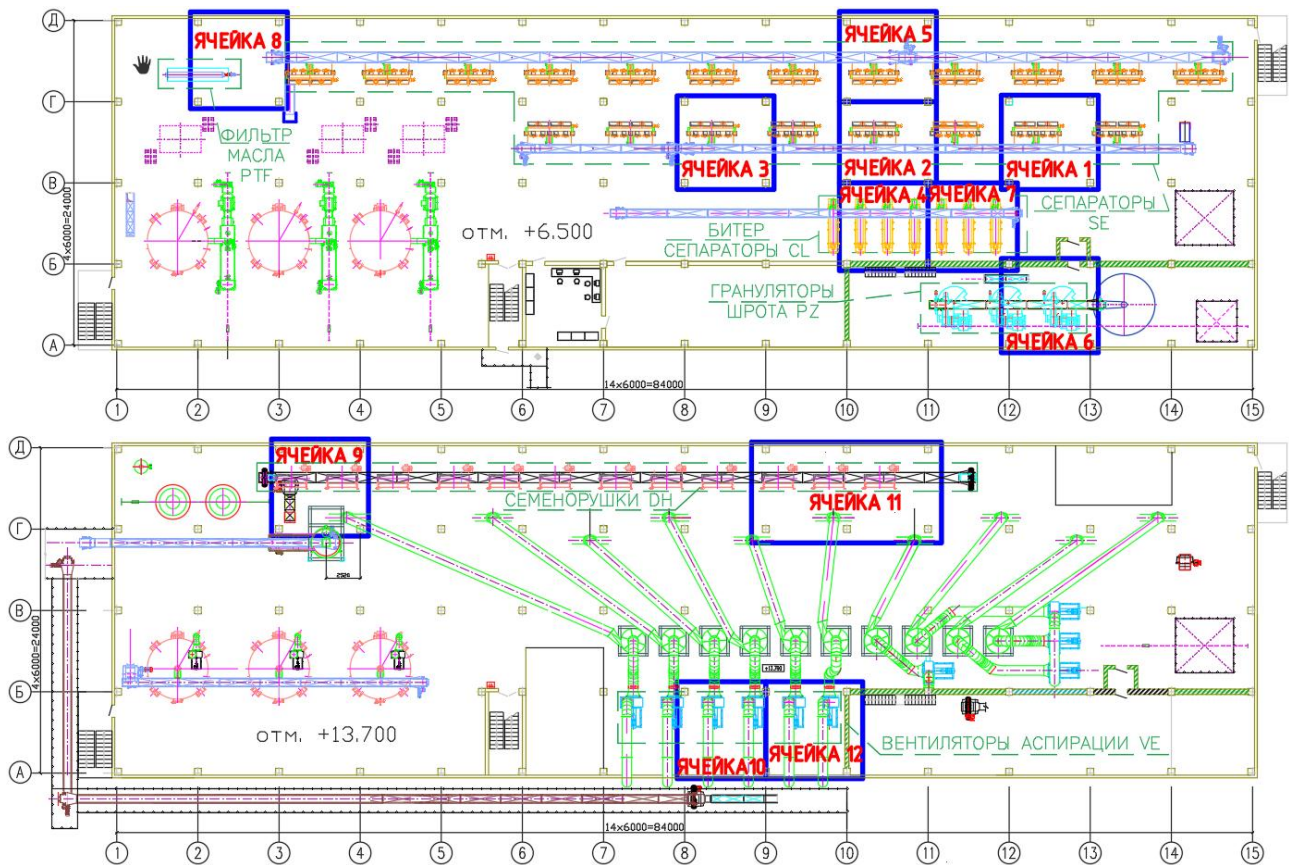
Определение параметров колебательных процессов производилось с помощью виброанализатора-регистратора портативного «Вибран-2.2», который состоит из электронного блока и вибродатчика. Также измерения производились посредством датчиков ускорения (акселерометров) Analog Device, работающие в двух плоскостях (X, Y). Сигналы с акселерометров через усилители поступали на 64-х каналный приемно-измерительный комплекс.

Программа измерений динамических параметров колебательных процессов была основана на анализе типов имеющегося оборудования в здании, который показал, что среди всего технологического оборудования основные характерные вибрации на строительные конструкции каркаса передаются с сепараторов SE (2 ряда в осях «В-Д, 3-15» на отметке +6,500), битер сепараторов CL (7 шт. в осях «Б-В, 9-12» на отметке +6,500), грануляторов шрота PZ (2 шт. в осях «А-Б, 11-13» на отметке +6,500), фильтров масла PTF (2 шт. в осях «Д-Г, 1-3» на отметке +6,500), семенорушек DH (ряд в осях «Г-Д, 3-11» на отметке +13,700), вентиляторов аспирации VE (в осях «А-В, 7-13» на отметке +13,700). В местах установки перечисленного технологического оборудования были выбраны характерные ячейки размером в плане 6,0\*6,0 м (в соответствии с размерами сетки несущих колонн каркаса здания). В результате регистрация колебаний была произведена в 12 ячейках здания. Схемы расположения оборудования и выбранных для измерения ячеек приведены на рис. 2.

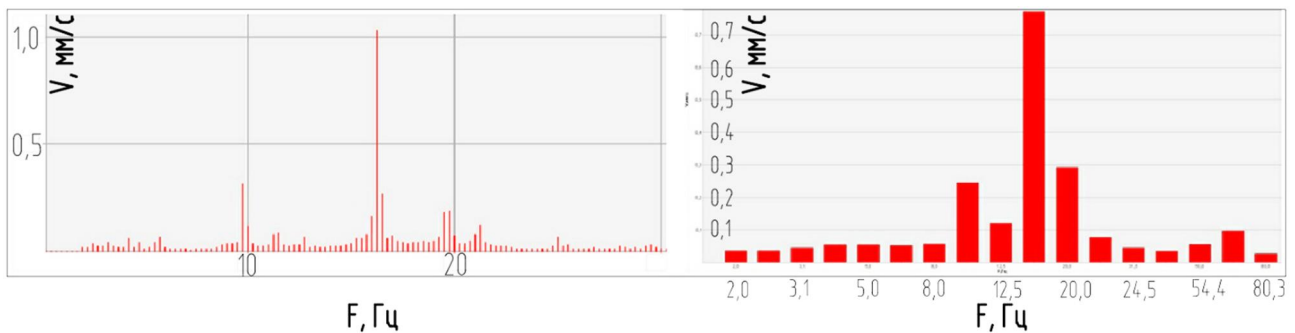
При измерениях датчики (акселерометры) устанавливались на несущих элементах каркаса (колонны, главные и второстепенные балки) и на оборудовании, передающем вибрации на строительные конструкции (датчики устанавливались на опоры оборудования и непосредственно на части, близкие к источникам колебаний - приводам). Регистрация колебаний производилась в направлениях трех главных ортогональных осей здания.

Целью замеров были: регистрация исходных сигналов; выявление установившихся частот колебаний; определение максимальных (пиковых) и среднеквадратичных значений ускорений, виброскоростей и виброперемещений; получение спектров мощности виброскоростей с раскладкой по частотам.

Ниже приведены характерные результаты измерений, полученные при помощи прибора «Вибран-2.2» в ячейке 1, при установке датчика на металлической колонне каркаса. На рис. 3 приведен зарегистрированный сигнал виброскорости в направлении буквенных осей (вдоль здания). На рис. 4 приведен спектр виброскоростей в направлении буквенных осей с раскладкой по частотам.



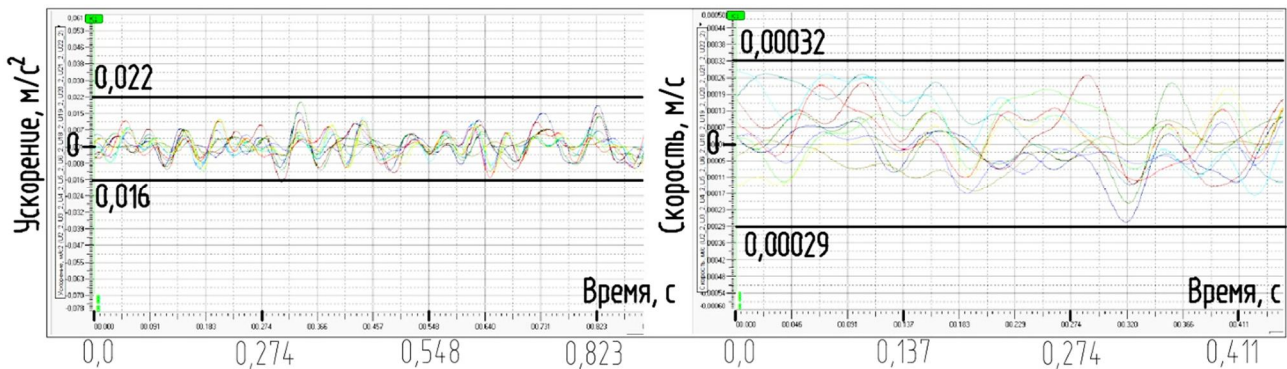




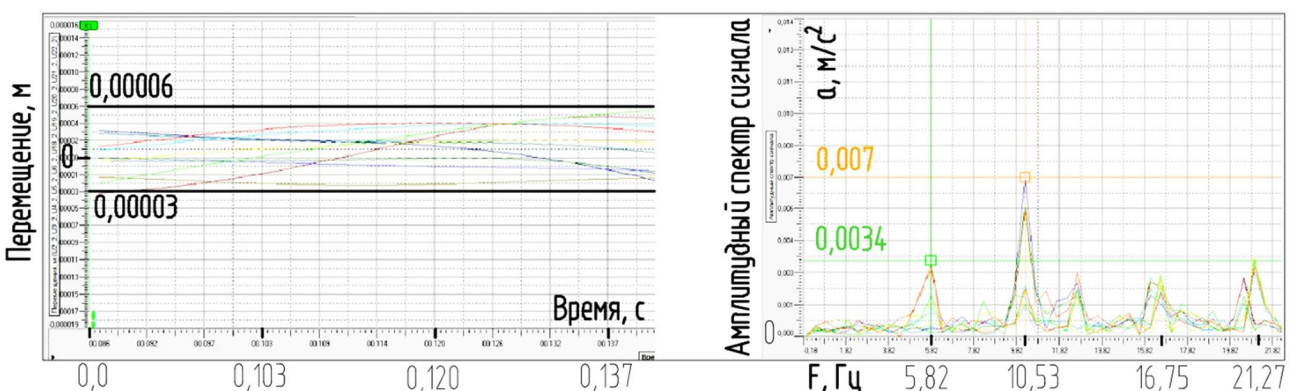
**Рисунок 4 – Спектр виброскоростей в направлении буквенных осей с раскладкой по частотам**  
слева – спектральное представление, справа – 1/3 октавный анализ,  $V_{\max}=1,03$  мм/с,  $f=16,25$  Гц

Далее приведены характерные результаты замеров 64-х канальной приемно-измерительной системой в ячейке №1. Графики ускорений и скоростей, зарегистрированные датчиками на опоре сепаратора и металлических колоннах каркаса в горизонтальной плоскости (в двух направлениях – вдоль цифровых и буквенных осей) представлены на рис. 5.

Графики перемещений и амплитудный спектр, зарегистрированные датчиками на опоре сепаратора и металлических колоннах каркаса в горизонтальной плоскости (в двух направлениях – вдоль цифровых и буквенных осей) представлены на рис. 6.



**Рисунок 5 – Графики ускорений (слева) и скоростей (справа)**  
зарегистрированы датчиками на опоре сепаратора и металлических колоннах каркаса в горизонтальной плоскости



**Рисунок 6 – Графики перемещений (слева) и амплитудный спектр (справа)**  
зарегистрированы датчиками на опоре сепаратора и металлических колоннах каркаса в горизонтальной плоскости

Вибрацию в здании подготовительного отделения завода Бунге СНГ в с. Колодезном Воронежской области можно классифицировать: по способу передачи на человека, как общую, передающуюся через опорные поверхности на тело сидящего или стоящего человека; по источнику возникновения вибраций, как общую вибрацию 3-ей категории (технологическая

вибрация, воздействующая на человека на рабочих местах стационарных машин или передающаяся на рабочие места, не имеющие источников вибрации, при этом к источникам технологических вибраций относятся также машины для очистки и сортировки зерна). Общая вибрация 3-ей категории по месту действия определена по типу как вибрация на постоянных рабочих местах производственных помещений предприятий; по направлению действия, как общая вибрация вдоль осей ортогональной системы координат; по характеру спектра – узкополосная вибрация, у которой контролируемые параметры в одной 1/3 октавной полосе частот более чем на 15 дБ превышают значения в соседних 1/3 октавных полосах; по частотному составу – в целом среднечастотная вибрация (с преобладанием максимальных уровней в октавных полосах 8-16 Гц для общих вибраций); по временным характеристикам – постоянная вибрация (величина нормируемых параметров изменяется не более чем в 2 раза за время наблюдения) [4].

В результате работ определены частоты основного тона колебаний технологического оборудования здания подготовительного отделения завода, получены следующие результаты: сепараторы SE (2-ой этаж) – 5,53...5,85 Гц; битей сепараторы CL (2-ой этаж) – 10,25...10,31 Гц; грануляторы шрота PZ – частоты основного тона не выявлены, в разных направлениях частоты различны и составляют: 46,62 Гц, 38,15 Гц, 55 Гц и 71,75 Гц (по указанным частотам на спектре мощностей сигнала отмечены максимальные всплески); фильтры масла PTF – 13,0 Гц; семенорушки DH – 9,75 Гц; вентиляторы аспирации VE – 24,69...24,75 Гц.

Анализ колебаний строительных конструкций (в основном несущих металлических колонн каркаса) показал, что на них передаются значительные ощутимые вибрации от работающего в здании технологического оборудования. Это говорит об отсутствии должной виброизоляции оборудования или его неисправной работе. Осмотр оборудования и его опор показал, что практически у всего оборудования отсутствуют виброопоры и изолирующие устройства.

В результате выполненных работ было установлено, что несущие металлические колонны каркаса и балки колеблются с частотой колебаний технологического оборудования. Причем выявлено, что наибольшее влияние на вибрации каркаса в целом оказывает технологическое оборудование третьего этажа, а конкретно ряд семенорушек DH в осях «Г-Х, 3-12», и вентиляторы аспирации VE.

Так зафиксировано, что металлические колонны третьего этажа по оси «Д» и колонны второго этажа по осям «Г», «Д» и частично «В» подвержены вибрации с частотой колебаний около 9,75 Гц – что является частотой колебаний ряда семенорушек на третьем этаже в осях «Г-Д, 3-12». Таким образом, получено, что два ряда сепараторов SE, установленных на втором этаже с частотой колебаний 5,75 Гц, не оказывают определяющего влияния на вибрации несущих колонн каркаса.

Вентиляторы аспирации VE, установленные на третьем этаже, имеют частоту колебаний 24,75 Гц, такая же частота колебаний зарегистрирована на окружающих их колоннах каркаса третьего и нескольких колоннах каркаса второго этажа (под местами установки вентиляторов аспирации VE).

Также в ходе работ было установлено, что при одновременной работе всего оборудования возникают многократно повторяющиеся резонансные явления при совпадении частоты колебаний и фаз отдельных механизмов. В такие моменты вибрация на несущих конструкциях увеличивается, а после прохождения некоторого периода времени резонанс исчезает и амплитуды вибраций уменьшаются.

Анализ резонансных явлений был произведен на примере ячейки 4 на втором этаже в осях «Б-В, 10-11», в которой установлены битей сепараторы CL. При сравнении амплитудных спектров сигналов с датчиков, установленных на битей сепараторах CL, второстепенных балках и колоннах, было выявлено, что максимальные амплитуды на битей сепараторах возникают на частоте 10,28 (20,56 Гц – второй пик), а на главных балках и колонах 24,89 Гц., т.е. вибрации битей сепараторов вызывают только колебания второстепенных балок, на которых

они жестко установлены. Биттер сепараторы работают на одних частотах (10,28 и 20,56 Гц). Отмечено увеличение амплитуды колебаний, вероятно из-за небольшой разницы частот и фаз при работе соседних биттер сепараторов, при совпадении фаз соседних биттер сепараторов происходит резонанс. Размах перемещений (ускорений, скорости) при резонансе в три раза больше обычного режима. Период появления резонанса и его продолжительность не периодичны, что может говорить о возникновении резонанса между несколькими биттер сепараторами, а не между двумя соседними, но все происходит в пределах одной ячейки потому что амплитуда колебаний главной балки гораздо ниже средних в ячейке.

Анализ данных выполненных замеров показал, что по полученным данным виброскоростей и виброускорений металлических колонн и балок каркаса на третьем этаже в местах установки семенорушек ДН и вентиляторов аспирации VE, требования [4] не выполняются.

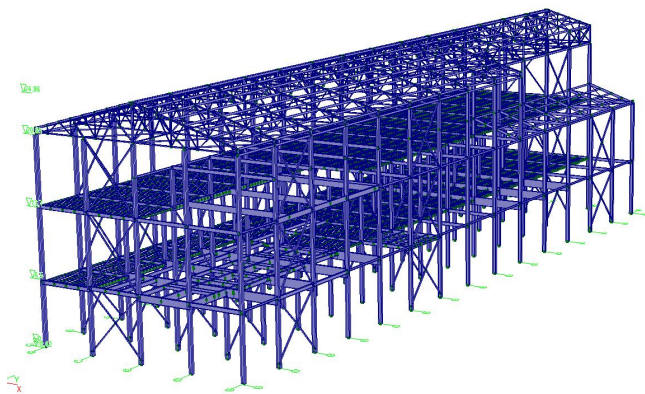
Семенорушки ДН работают на частоте 9,75 Гц и вызывают колебания колонн и балок вокруг себя с той же частотой.

На частоте 9,75 Гц зафиксированы следующие значения виброскоростей для колонн и балок: 9,41 мм/с; 1,56 мм/с; 2,65 мм/с; 4,59 мм/с. Согласно требованиям предельные значения виброскоростей на частоте 9,75 Гц при 1/3 октавном анализе должны не превышать 1,1 мм/с.

На частоте 9,75 Гц зафиксированы следующие значения виброускорений для балок: 136 мм/с<sup>2</sup>; 173 мм/с<sup>2</sup>; 369 мм/с<sup>2</sup>. Согласно требований предельные значения виброускорений на частоте 9,75 Гц при 1/3 октавном анализе должны не превышать 70 мм/с<sup>2</sup>.

Вентиляторы аспирации VE работают на частоте 24,75 Гц и вызывают колебания колонн и балок вокруг себя с той же частотой. На частоте 24,75 Гц зафиксированы следующие значения виброскоростей для колонн и балок: 1,4 мм/с; 1,31 мм/с. Согласно требованиям предельные значения виброскоростей на частоте 24,75 Гц при 1/3 октавном анализе не должны превышать 1,1 мм/с.

В дальнейшем полученные данные о параметрах колебательных процессов строительных конструкций здания подготовительного отделения были использованы для сопоставления с собственными частотами колебаний элементов несущего каркаса с целью выявления возможных резонансных явлений, и возникающих при этом амплитуд колебаний и уровней напряжений в строительных конструкциях.



**Рисунок 7 – Пространственная конечно-элементная схема несущего каркаса здания подготовительного отделения завода «Бунге СНГ»**

Для оценки частот собственных колебаний элементов несущего каркаса здания подготовительного отделения была создана его пространственная конечно-элементная схема

(рис. 7). Для расчетов был использован проектно-вычислительный комплекс «SCAD». Схема была выполнена с использованием стержневых универсальных элементов № 10, количество элементов 10182, количество узлов 5187. Нагрузки от виброактивного оборудования при этом создавались в соответствии с зарегистрированными параметрами во вкладке динамические воздействия.

В результате выполненных численных расчетов были получены формы собственных и вынужденных колебаний здания,

соответствующие им частоты и периоды, эпюры усилий в элементах несущего каркаса при невыгодных сочетаниях нагрузок, а также с учетом работы виброактивного оборудования в различных вариантах.

Оценка прочности элементов каркаса была выполнена с применением поверхностей отнормированного сопротивления по прочности [5-8].



Условия относительной прочности нормальных сечений стержневых металлических элементов (во всем диапазоне их загрузки от растяжения до сжатия) были определены численно, на основе деформационной модели, и аналитически. Предельные изгибающие моменты, воспринимаемые элементом, приняты относительно центра тяжести сечения. За единичные параметры назначены несущая способность сечения при сжатии и сжатии с изгибом относительно его центра тяжести (рис. 8).

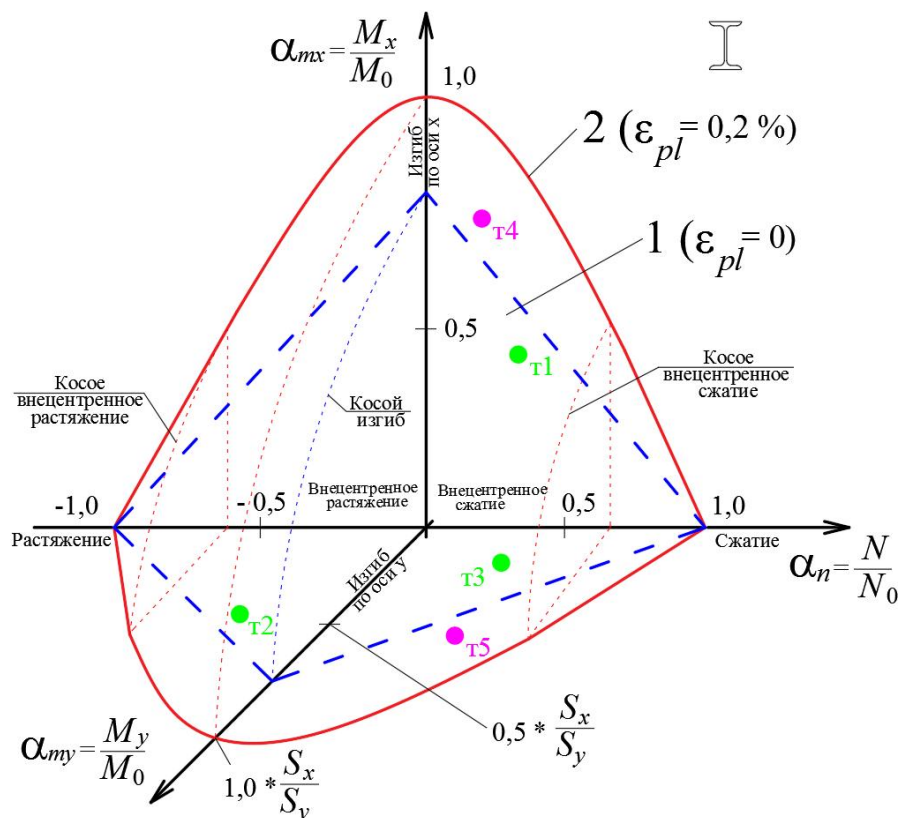


Рисунок 8 – Поверхность относительного сопротивления по прочности при любом сочетании продольной силы и изгибающих моментов двух плоскостей  
 $\varepsilon_{pl} = 0$  – линия 1 и  $\varepsilon_{pl} = 0,2$  – линия 2

Анализ результатов численных и аналитических расчетов, в которых варьировались виды нелинейных диаграмм деформирования стали; величины предельных деформаций; скорости деформирования и другие параметры, показал, что при статическом нагружении зависимости предельного относительного изгибающего момента  $\alpha_{mx} = M/(R_i S)$  от относительного продольного усилия  $\alpha_n = N/(R_i A)$  (и зависимости  $\alpha_{my}$  от  $\alpha_n$ ) соответствует область, ограниченная выпуклой кривой – при наличии пластических деформаций в сечении. При динамическом нагружении данная область трансформируется вокруг временной координаты (в аналитических расчетах) и координаты скорости деформирования (в численных расчетах), описывая поверхность относительной динамической прочности нормальных сечений стержневых элементов.

На рис. 8 приведены поверхности относительной прочности двутаврового сечения, полученные численно на основе деформационной модели и нелинейной диаграммы для стали. При одинаковой прочности стали стенок и полков в зависимости от величины пластических деформаций  $\varepsilon_{pl}$  очертания границ относительной прочности сечений изменяются. При  $\varepsilon_{pl} = 0$  (кривая 1 на рис. 8) границы областей относительной прочности ограничены четырьмя отрезками прямых линий. При этом максимальные и минимальные относительные моменты равны  $\pm 2/3$ .

При учете пластических деформаций границы областей прочности (кривая 2 на рис. 8) искривляются, площадь относительной прочности увеличивается, при этом максимальный относительный момент приближается к единице.

Большая наглядность в расчетах прочности элементов достигается при векторном представлении относительных усилий, возникающих в рассматриваемых сечениях, части или элементе в целом от внешних воздействий. При этом каждому воздействию или сумме воздействий будут соответствовать компоненты векторов действующих относительных усилий. Концы данных векторов описывают поле или поверхность относительных усилий от внешних воздействий. В то же время отдельным точкам поверхности или областям относительной прочности элементов соответствуют компоненты вектора сопротивления. Разность между компонентами векторов относительного сопротивления и действующих относительных усилий названа компонентами векторов запаса прочности сечений элементов. При положительном их значении условия прочности рассматриваемого элемента выполняются, в противном случае – не выполняются. Графически это означает, что если вектора относительных усилий от внешних воздействий располагаются внутри поверхности сопротивления, то условия прочности сечений выполняются, если выходят за пределы поверхности сопротивления, то прочность не обеспечивается.

На рис. 8 точками обозначены концы векторов относительных усилий от нагрузок 1...5. При отсутствии пластических деформаций для нагрузок 1, 2, 3 прочность обеспечена, а для 4 и 5 – не обеспечена. Для 4 нагрузки перегрузка по моменту составила 9,86 %. При пластических деформациях прочность для всех нагрузок обеспечена, при этом для 4 нагрузки запас по моменту равен 19,1 %.

На основании сопоставительного анализа всех зарегистрированных данных и полученных результатов расчетов были разработаны рекомендации по вариантам устранения негативных влияний вибраций на строительные конструкции несущего каркаса здания, включающие повышение жесткости междуэтажных перекрытий (устройство железобетонного заполнения) или установку виброизоляционных опор на соответствующие частоты колебаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кумпяк, О.Г. Особенности диагностики нагруженных фундаментов электроприводов газокompрессорной станции без остановки технологических процессов /О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов, Г.И. Однокопылов, О.Р. Пахмури // Вестник ТГАСУ. 2017. - № 1, С. 114-121.
2. Копаница, Д.Г. Влияние жесткости колонн на динамические параметры пространственного железобетонного каркаса в процессе ремонта /Д.Г. Копаница, С.Л. Капарулин, Е.В. Васильева// Вестник ТГАСУ. 2006. № 1. С. 164-169.
3. Копаница, Д.Г. Взаимосвязь напряженного состояния сжато колонны и частоты собственных колебаний /Д.Г. Копаница, С.Л. Капарулин, А.С. Пляскин, А.М. Устинов, А.С. Каличкина// В сборнике: инвестиции, строительство и недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики. Материалы пятой всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 частях. 2015. С. 294-300.
4. СН.2.2.4/2.1.8.566-96 «Производственная вибрация. Вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы».
5. Плевков, В.С. Исследование железобетонных элементов при косом внецентренном кратковременном динамическом сжатии, растяжении и изгибе /В.С. Плевков, Д.Ю. Саркисов, О.Ю. Тигай // Известия ОрелГТУ, Серия «Строительство. Транспорт» № 3/19 (549) 2008. Орел., 2008. – С. 33-37.
6. Плевков, В.С. Прочность железобетонных колонн пространственно-работающих каркасов зданий при динамических воздействиях / В.С. Плевков, И.В. Балдин, С.В. Балдин, Д.Ю. Саркисов, М.Е. Гончаров// Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы международных академических чтений. – Курск., 2007. – С. 123-126.
7. Plevkov, V.S. Estimation of operated ferro-concrete structures strength of usual and prestressed reinforcing under longitudinal forces bending and twisting moments / V.S. Plevkov, A.I. Malganov, I.V. Baldin, P.V. Stukov, K.V. Kalachev, D.Yu. Sarkisov// 8th Korea - Russia International Symposium on Science and Technology. KORUS 2004. Volume 2. Tomsk, Tomsk Polytechnic University., 2004. pp. 342-344.

8. Саркисов, Д.Ю. Прочность и деформативность железобетонных элементов прямоугольного сечения при косом внецентренном кратковременном динамическом сжатии, растяжении и изгибе /Д.Ю. Саркисов// Вестник ТГАСУ. 2008. - № 3, С. 134-143

**Плевков Василий Сергеевич**

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции»

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

**Саркисов Дмитрий Юрьевич**

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции»

Г. Томск, ул. Ивановского, 22, кв. 257.

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

**Балдин Сергей Владимирович**

ООО «ТомскСЭП», г. Томск

Кандидат технических наук, ведущий специалист

Г. Томск, пр. Фрунзе, 77б, кв. 80.

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

---

V.S. PLEVKOV, D.Yu. SARKISOV, S.V. BALDIN

## ANALYSIS OF PARAMETERS OF VIBRATIONAL PROCESSES OF THE CARRYING FRAMEWORK OF THE INDUSTRIAL BUILDING

*The paper presents the results of studies of the parameters of the oscillatory processes of the structural structures of the bearing frame of the building of the preparatory department of the plant "Bunge CIS" in the village. Well of the Voronezh region. The approaches to the solution of the problem of excessive vibrations of elements of a bearing metal frame are described. The data of the recorded measurements at the facility with special instruments - Vibran 2.2 and a multichannel measuring system - are analyzed. The technique of measurements, the scheme of arrangement of acceleration sensors is described. The frequencies of oscillations are estimated, the results of spectral analysis are presented. The main causes of excessive vibrations of the frame elements of the building are identified and the types of equipment that have the maximum influence on the vibration of building structures at the facility are established. Numerical static and dynamic calculations are performed, the bearing capacity is estimated using an original technique based on the surfaces of the relative resistance, and recommendations are given for reducing the production vibration.*

**Key words:** oscillations; vibration; frequency of oscillations; vibration speed; vibration acceleration; surface of relative resistance.

### BIBLIOGRAPHY

1. Kumpyak, O.G. Osobennosti diagnostiki nagruzhennykh fundamentov elektroprivodov gazokompressornoy stantsii bez ostanovki tekhnologicheskikh protsessov /O.G. Kumpyak, Z.R. Galyautdinov, G.I. Odnokopylov, O.R. Pakhmurin // Vestnik TGASU. 2017. - № 1, S. 114-121.
2. Kopanitsa, D.G. Vliyaniye zhestkosti kolonn na dinamicheskiye parametry prostranstvennogo zhelezobetonno karkasa v protsesse remonta /D.G. Kopanitsa, S.L. Kaparulin, Ye.V. Vasil'yeva// Vestnik TGASU. 2006. № 1. S. 164-169.
3. Kopanitsa, D.G. Vzaimosvyaz' napryazhennogo sostoyaniya szhato kolonny i chastoty sobstvennykh kolebaniy /D.G. Kopanitsa, S.L. Kaparulin, A.S. Plyaskin, A.M. Ustinov, A.S. Kalichkina// V sbornike: investitsii, stroitel'stvo i nedvizhimost' kak material'nyy bazis modernizatsii i innovatsionnogo razvitiya ekonomiki. Materialy pyatoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem: v 2 chastyakh. 2015. S. 294-300.
4. SN.2.2.4/2.1.8.566-96 «Proizvodstvennaya vibratsiya. Vibratsiya v pomeshcheniyakh zhilykh i obshchestvennykh zdaniy. Sanitarnyye normy».
5. Plevkov, V.S. Issledovaniye zhelezobetonnykh elementov pri kosom vnetsentrennom kratkovremennom dinamicheskom szhatii, rastyazhenii i izgibe /V.S. Plevkov, D.YU. Sarkisov, O.YU. Tigay // Izvestiya OrelGTU, Seriya «Stroitel'stvo. Transport» № 3/19 (549) 2008. Orel., 2008. – S. 33-37.

6. Plevkov, V.S. Prochnost' zhelezobetonnykh kolonn prostranstvenno-rabotayushchikh karkasov zdaniy pri dinamicheskikh vozdeystviyakh / V.S. Plevkov, I.V. Baldin, S.V. Baldin, D.YU. Sarkisov, M.Ye. Goncharov// Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. Materialy mezhdunarodnykh akademicheskikh chteniy. – Kursk., 2007. – S. 123-126.
7. Plevkov, V.S. Estimation of operated ferro-concrete structures strength of usual and prestressed reinforcing under longitudinal forces bending and twisting moments / V.S. Plevkov, A.I. Malganov, I.V. Baldin, P.V. Stukov, K.V. Kalachev, D.Yu. Sarkisov// 8th Korea - Russia International Symposium on Science and Technology. KORUS 2004. Volume 2. Tomsk, Tomsk Polytechnic University., 2004. pp. 342-344.
8. Sarkisov, D.YU. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh elementov pryamougol'nogo secheniya pri kosom vnetsentrennom kratkovremennom dinamicheskom szhatii, rastyazhenii i izgibe /D.YU. Sarkisov// Vestnik TGASU. 2008. - № 3, S. 134-143.

**V.S. Plevkov**

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering

Doctor of technical sciences, professor, professor of the department "Reinforced concrete and stone structures"

G. Tomsk, Sovetskaya, 97b, apt. 2.

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

**D.Yu. Sarkisov**

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering

Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of the department "Reinforced concrete and stone structures"

G. Tomsk, Ivanovsky, 22, apt. 257.

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

**S.V. Baldin**

TomskSEP LLC

Candidate of Technical Sciences, Leading Specialist

G. Tomsk, Frunze Ave., 77b, Apt. 80.

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

ТАМРАЗЯН А.Г., МАНАЕНКОВ И.К.

## ИСПЫТАНИЕ ТРУБОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ АРМИРОВАНИЯ

*В статье изложена методика и результаты испытания коротких трубобетонных элементов малого диаметра с относительно высоким коэффициентом армирования. В качестве обоймы для бетонного ядра использовались электросварные прямошовные стальные трубки 42х1,4 мм и 41,5х1,7 мм. При таком виде косвенного армирования бетон, поперечные деформации которого ограничены, работает в условиях трехосного сжатия, что повышает его прочностные и деформационные характеристики. Представлены данные о несущей способности образцов, диаграммы продольных деформаций, поперечных деформаций и коэффициента Пуассона в зависимости от уровня сжимающей нагрузки. Приведен расчет несущей способности на основании EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4 и на основании зависимостей, предложенных различными авторами. Произведено сравнение теоретических значений несущей способности со значениями, полученными по результатам эксперимента.*

**Ключевые слова:** трубобетон, косвенное армирование, коэффициент армирования, объемное напряженное состояние.

### Введение

Косвенное армирование является одним из эффективных способов повышения несущей способности бетона на сжатие. При таком виде армирования бетон, поперечные деформации которого ограничены, работает в условиях трехосного сжатия. За счет этого повышаются его прочностные и деформационные характеристики, и может быть достигнута существенная экономия материалов.

Эффект косвенного армирования известен с начала 20 века. Существует множество предложений по применению косвенного армирования для сжатого бетона в различных конструкциях [1-2]. При этом до сих пор появляются новые варианты усиления сжатых и изгибаемых элементов при помощи косвенного армирования, и совершенствуются методики расчета [3-10].

Одним из самых эффективных вариантов косвенного армирования является применение в качестве обоймы для бетона стальных труб круглого сечения.

### Методика проведения и результаты эксперимента

Авторами были испытаны на центральное сжатие 2 серии коротких ( $L/d \leq 4$ ) трубобетонных образцов малого сечения (Рисунок 1.а)). Длина образцов  $L=170$  мм. В качестве косвенного армирования применялись электросварные прямошовные трубы диаметром  $d \approx 42$  мм с толщиной стенки для первой серии  $t_I=1,4$  мм; для второй серии  $t_{II}=1,7$  мм. Из-за малости сечения, даже при достаточно тонкой стенке трубы, коэффициент армирования  $\mu_{xy}$  получался относительно высоким. Для бетонного ядра применялся тяжелый бетон с гранитным заполнителем крупности 3-10 мм.

Чтобы не допустить разрушения торцов опытных образцов устраивались сварные стальные оголовки. Относительные деформации замерялись при помощи электротензорезисторов с базой 5 мм, которые размещались в среднем сечении по периметру образца (4 шт. для измерения продольных деформаций; 2 шт. для измерения поперечных деформаций). При построении опытных диаграмм показания датчиков осреднялись. Также поперечные деформации замерялись тензодатчиками с базой 1 мм, размещенными на электросварном шве.

Образец вначале центрировался пробной нагрузкой  $(0,1 \dots 0,2)N_u$ , после чего подвергался нагружению ступенями по  $0,1N_u$  с десятиминутными выдержками между ступенями. Потеря несущей способности образцов происходила после потери местной устойчивости стенкой

трубы и образования складок на поверхности образцов (Рисунок 1.б)). При дальнейшем нагружении происходило плавное падение несущей способности образцов при быстром росте деформаций. Поперечные деформации, замеренные на электросварном шве на начальных этапах загрузения, практически не отличались от деформаций на остальной поверхности образца и только при нагрузках более  $(0,6...0,7)N_u$  начинали превышать значения, полученные по остальным тензодатчикам (до 25% превышения). Но из-за малости зоны электросварного шва, разницей можно пренебречь.

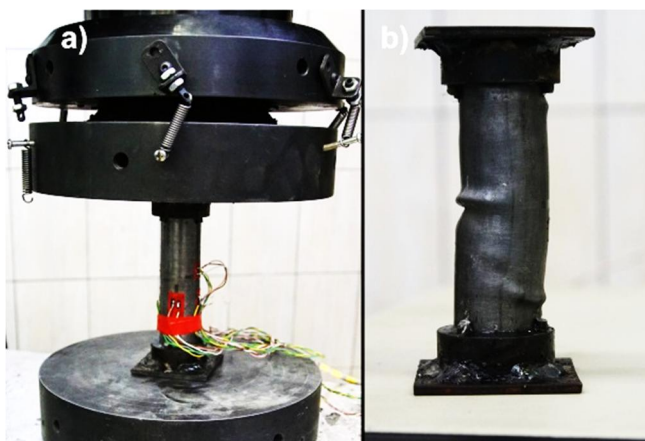


Рисунок 1 - а) Испытание образцов;  
б) Образец после испытания

Основные параметры опытных образцов и результаты испытаний представлены в таблице 1. Диаграммы деформирования образцов, полученные после обработки тензометрических данных, приведены на рисунке 2.

После достижения относительных деформаций 0,01 отдельные тензодатчики начинали выходить из строя и в целом точность измерений, при деформациях превышающих это значение, невелика, но полученные данные позволяют определить порядок относительных деформаций.

Прочностные и деформационные характеристики для бетона определялись испытанием прямоугольных призм 15х15х60 см, для стали – испытанием образцов труб на разрыв. Во избежание смятия трубы в местах захватов, в торцах трубы размещались вкладыши из стального проката круглого сечения.

Таблица 1 - Параметры опытных образцов и результаты испытаний

Образец	Сечение трубы $d \times l$ , мм	Коэффициент армирования, $\mu_{ky}$	Прочность трубы по пределу текучести $R_s$ , МПа	Призменная прочность бетона $R_b$ , МПа	Несущая способность трубо-бетонного образца, $N_u$ , кН	Средняя несущая способность для серии, $N_{um,exp}$ , кН
I-1	42х1,4	0,148	324,59	23,51	126,75	126,55
I-2	42х1,4	0,148	324,59	23,51	126,63	
I-3	42х1,4	0,148	324,59	23,51	127,21	
I-4	42х1,4	0,148	324,59	23,51	125,60	
II-1	41,5х1,7	0,186	381,13	23,51	144,58	144,10
II-2	41,5х1,7	0,186	381,13	23,51	144,76	
II-3	41,5х1,7	0,186	381,13	23,51	142,12	
II-4	41,5х1,7	0,186	381,13	23,51	144,94	

### Сравнение опытных данных с существующими методиками расчета

При расчете несущей способности трубобетонных элементов повышаются прочностные характеристики бетона в зависимости от коэффициента эффективности косвенного армирования, зависящего от уровня обжатия, которое в свою очередь зависит от ряда факторов.

В EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4 для определения несущей способности приведена зависимость:

$$N_u = \eta_s A_s R_s + A_b f_c [1 + \eta_b (t/d) (R_s/f_c)], \quad (1)$$



где  $A_s$  и  $A_b$  – площади сечений стальной трубы и бетонного ядра соответственно, мм<sup>2</sup>;  
 $f_c$  – цилиндрическая прочность бетона, МПа;  
 $\eta_s$  и  $\eta_b$  – коэффициенты, зависящие от относительной гибкости  $\bar{\lambda}$ .

Таким образом, уровень обжатия зависит от толщины стенки, диаметра трубы и соотношения прочностных характеристик стали и бетона. При этом к прочности стали вводится понижающий коэффициент  $\eta_s$ . При расчете по выражению (1) цилиндрическая прочность бетона принималась  $f_{cm}=25$  МПа.

Аналогичный подход к определению несущей способности трубобетона использован С.Б. Крыловым [11]:

$$N_u = 0,75 R_s A_s + R_b A_b \left\{ 1 + [a + b \cdot e^{\frac{-1}{c}(R_s A_s + R_b A_b)}] \frac{t}{d - 2t} \frac{R_s}{R_b} \right\}, \quad (2)$$

где  $e$  – случайный эксцентриситет;

$a$ ,  $b$ ,  $c$  – эмпирические коэффициенты, полученные на основании анализа большого числа опытных данных.

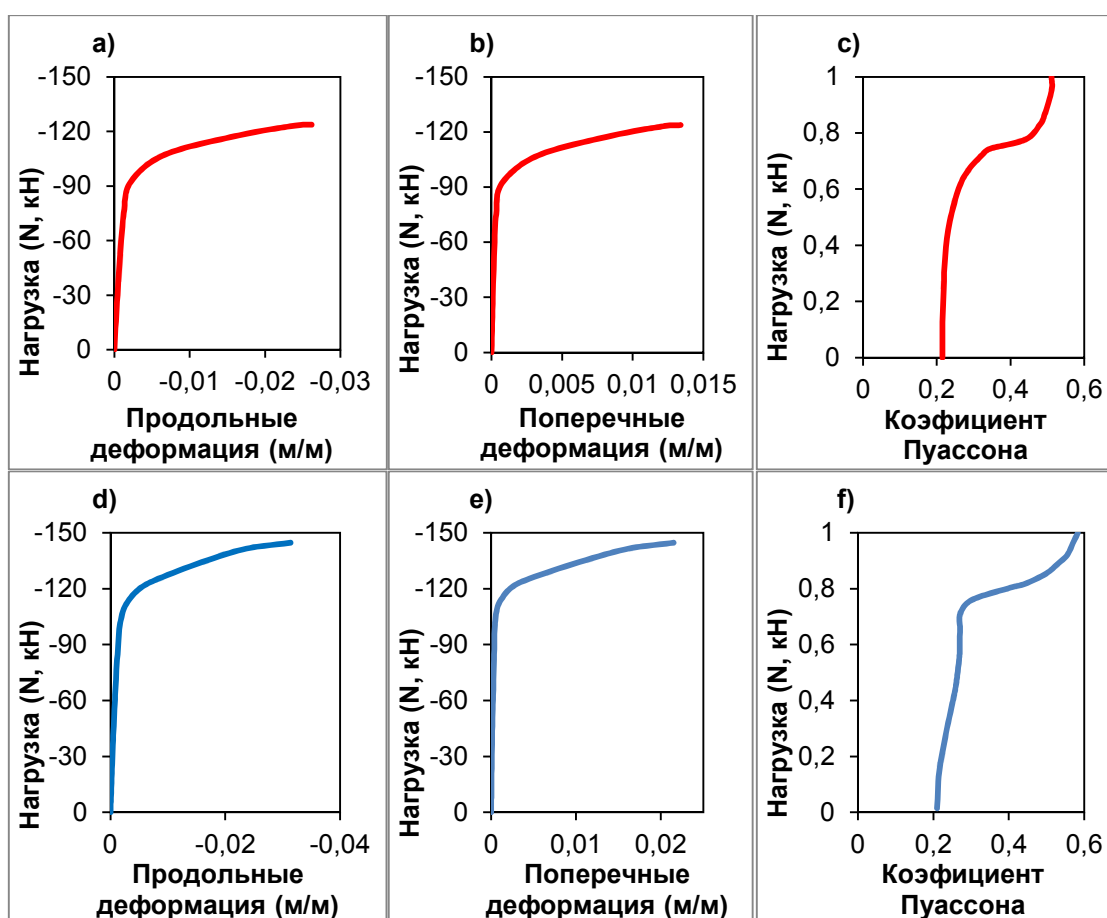


Рисунок 2 - Зависимости относительных продольных деформаций, поперечных деформаций и коэффициента Пуассона от сжимающей нагрузки  $N$  (относительной сжимающей нагрузки  $N/N_u$ ) для образцов серии I [a),b),c)] и серии II [d),e),f)] соответственно.

Видно, что в зависимости (2), также как и в (1), помимо повышающего коэффициента для бетона, вводится понижающий коэффициент 0,75 для стали. Это объясняется сложным напряженно-деформированным состоянием трубы, испытывающей помимо продольного сжатия, тангенциальное растяжение из-за давления бетонного ядра.

И.Г. Лютковским [12] для определения несущей способности трубобетонных элементов предлагается зависимость:

$$N_u = R_b A_b + \alpha R_s A_s, \quad (3)$$

где  $\alpha = \sqrt{1 + \frac{(k-1)^2}{3}},$

$$k = 4,8 d^{0,18} (0,03 \mu_{xy}^{-0,72} + 1).$$

Таблица 2 - Сравнение экспериментальных и теоретических значений несущей способности трубобетонных элементов

	Серия I	Среднее отклонение от экспериментального значения	Серия II	Среднее отклонение от экспериментального значения
$N_{um,exp}$ , кН	126,55	-	144,10	-
$N_{u,theory}$ , кН (Eurocode)	107,93	-14,7%	135,16	-6,2%
$N_{u,theory}$ , кН (С.Б. Крылов)	135,08	6,7%	175,19	21,6%
$N_{u,theory}$ , кН (И.Г. Лютковский)	148,59	17,4%	192,44	33,5%
$N_{u,theory}$ , кН (А.Л. Кришан)	133,62	5,6%	145,51	1,0%

В данном случае коэффициент  $\alpha$  вводится только к прочностным характеристикам стали и при этом  $\alpha > 1$ .

А.Л. Кришан для определения разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов [13] использовал выражение:

$$N_u = (R_b + k \sigma_{br}) A_b + \alpha_s R_s A_s. \quad (4)$$

Здесь боковое давление  $\sigma_{br}$  и коэффициент  $\alpha_s$  зависят от площадей стали и бетона и коэффициента бокового давления  $k$ , который в свою очередь можно определить по формуле [14]:

$$k = 5,3 - 0,8 \frac{R_s A_s}{R_b A_b}, \quad (5)$$

Сравнение экспериментальных данных о несущей способности с теоретическими значениями, рассчитанными по зависимостям (1)-(5) приведено в таблице 2.

## Выводы

Обойма в виде стальной трубы позволяет существенно повысить прочность на сжатие бетонного ядра.

Значительная разница опытной несущей способности и теоретической (особенно для серии II), вычисленной по зависимостям, предлагаемым С.Б. Крыловым и И.Г. Лютковским, объясняется тем, что они включают эмпирические коэффициенты, полученные для образцов с  $\rho_l < 0,14$  и  $d > 100$  mm. Очевидно, они не подходят для образцов малого сечения с высоким коэффициентом армирования.

Зависимость (1), приведенная в EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4, дает более близкие к опытным значения несущей способности (по крайней мере, для трубобетонных элементов малого сечения).

Наилучшая сходимость получена на основании выражения (4) А.Л. Кришана. Среднее отклонение от экспериментальных значений составило 5,6% для серии I и 1,0% для серии II.

В дальнейшем подобные трубобетонные элементы предполагается применять в качестве сжатых элементов ферм и для усиления сжатой зоны изгибаемых конструкций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов, Н.Н. Влияние косвенного армирования на деформации бетона [Текст] / Н.Н. Попов, Н.Н. Трекин, Н.Г. Матков // Бетон и железобетон. - 1988. - №11. - С. 33-36.
2. Манаенков, И.К. Учет свойств ограниченного бетона в российских нормах проектирования бетонных и железобетонных конструкций [Текст] / И.К. Манаенков // Новая наука: стратегии и векторы развития. - 2015. - №4. - С. 89-92.
3. Alacali, S.N. Prediction of lateral confinement coefficient in reinforced columns using neural network simulation / S.N. Alacali, B. Akbas, B. Dorana // Appl. Soft Comput. - 2010. - №11. - pp. 2645-2655
4. Masoudnia, R. Badaruzzaman An Analytical model of short steel box columns with concrete in-fill / R. Masoudnia, S. Amiri, W.H. Wan Badaruzzaman // Aust. j. basic appl. sci. - 2011. - №5, - pp. 1715-1721
5. E. Choi, S.-H. Park, B.-S. Cho, D. Hui, J. Alloys Compd. Lateral reinforcement of welded SMA rings for reinforced concrete columns / E. Choi, S.-H. Park, B.-S. Cho, D. Hui // Alloys Compd. - 2013. №577S. - pp. 756-759
6. Naeef, M. Prediction of Lateral Confinement Coefficient in Reinforced Concrete Columns using M5 Machine Learning Method / M. Naeef, M. Bali, M.R. Naeef, J.V. Amir // Journal of Civil Engineering. - 2013, - №17(7). - pp. 1714-1719.
7. Ванус, Д.С. Деформативность и трещиностойкость изгибаемых элементов с косвенным армированием [Текст] / Д.С. Ванус // Промышленное и гражданское строительство. - 2009. - №4. - С. 57-61.
8. Тамразян, А.Г. К расчету изгибаемых железобетонных элементов с косвенным армированием сжатой зоны [Текст] / А.Г. Тамразян, И.К. Манаенков // Промышленное и гражданское строительство. - 2016. - №7. - С. 41-44.
9. Тамразян, А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы [Текст] / А.Г. Тамразян // Промышленное и гражданское строительство. - 2014. - № 7. - С. 51-54.
10. Тамразян, А.Г. Динамическая устойчивость сжатого железобетонного элемента как вязкоупругого стержня [Текст] / А.Г. Тамразян // Вестник МГСУ. - 2011. - № 1-2. - С.193-196.
11. Крылов, С.Б. Расчетные сопротивления бетона и стали в центрально и внецентренно сжатых трубобетонных конструкциях [Текст] / С.Б. Крылов, П.П. Смирнов // Строительная механика и расчет сооружений. - 2016. - №3. - С. 20-24
12. Людковский, И.Г. Прочность и деформативность трубобетонных элементов при осевом сжатии [Текст] / И.Г. Людковский, В.М. Фонов, А.П. Нестерович // Бетон и железобетон. - 1989. - №1. - С.4-6
13. Кришан, А.Л. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов [Текст] / А.Л. Кришан, А.И. Заикин, М.С. Купфер // Бетон и железобетон. - 2008. - №2, - С.22-24
14. Кришан, А.Л. Трубобетонные колонны для высотных зданий [Текст] / А.Л. Кришан, В.В. Ремнев // Промышленное и гражданское строительство. - 2009. - №10. - С.22-24.

#### Тамразян Ашот Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва

Заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, доктор технических наук, профессор

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

#### Манаенков Иван Константинович

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва

Аспирант

E-mail: [manaenkov.i.k@gmail.com](mailto:manaenkov.i.k@gmail.com)

---

A.G. TAMRAZIAN, I.K. MANAENKOV

### TESTING OF SMALL-DIAMETER PIPE-CONCRETE SAMPLES WITH A HIGH REINFORCEMENT FACTOR

*The article describes the technique and results of testing short pipe elements with a small diameter and a relatively high reinforcement factor. Electric-welded straight-through steel tubes 42x1,4 mm and 41,5x1,7 mm were used as a cradle for the concrete. With this type of indirect reinforcement concrete whose transverse deformations are limited works under conditions of triaxial compression that increases*

*its strength and deformation characteristics. The article presents data on the load-bearing capacity of the samples, the longitudinal strain diagram, the transverse deformations and the Poisson's ratio depending on the level of the compressive load. The load-carrying capacity is calculated on the basis of EN 1994-1-1: 2004 Eurocode 4 and based on the dependencies offered by different authors. The theoretical values of the load-carrying capacity were compared with the values obtained from the results of the experiment.*

**Key words:** pipe-concrete, indirect reinforcement, reinforcement factor, volumetric stress state.

## BIBLIOGRAPHY

1. Popov, N.N. Vliyaniye kosvennogo armirovaniya na deformatsii betona [Tekst] / N.N. Popov, N.N. Trekin, N.G. Matkov // Beton i zhelezobeton. - 1988. - №11. - S. 33-36.
2. Manayenkov, I.K. Uchet svoystv ogranichenogo betona v rossiyskikh normakh proyektirovaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy [Tekst] / I.K. Manayenkov // Novaya nauka: strategii i vektory razvitiya. - 2015. - №4. - S. 89-92.
3. Alacali, S.N. Prediction of lateral confinement coefficient in reinforced columns using neural network simulation / S.N. Alacali, B. Akbas, B. Dorana // Appl. Soft Comput. - 2010. - №11. - pp. 2645-2655
4. Masoudnia, R. Badaruzzaman An Analytical model of short steel box columns with concrete in-fill / R. Masoudnia, S. Amiri, W.H. Wan Badaruzzaman // Aust. j. basic appl. sci. - 2011. - №5. - pp. 1715-1721
5. E. Choi, S.-H. Park, B.-S. Cho, D. Hui, J. Alloys Compd. Lateral reinforcement of welded SMA rings for reinforced concrete columns / E. Choi, S.-H. Park, B.-S. Cho, D. Hui // Alloys Compd. - 2013. №577S. - pp. 756-759
6. Naej, M. Prediction of Lateral Confinement Coefficient in Reinforced Concrete Columns using M5 Machine Learning Method / M. Naej, M. Bali, M.R. Naej, J.V. Amir // Journal of Civil Engineering. - 2013, - №17(7). - pp. 1714-1719.
7. Vanus, D.S. Deformativnost' i treshchinostoykost' izgibayemykh elementov s kosvennym armirovaniyem [Tekst] / D.S. Vanus // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. - 2009. - №4. - S. 57-61.
8. Tamrazyan, A.G. K raschetu izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov s kosvennym armirovaniyem szhatoy zony [Tekst] / A.G. Tamrazyan, I.K. Manayenkov // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. - 2016. - №7. - S. 41-44.
9. Tamrazyan, A.G. Beton i zhelezobeton: problemy i perspektivy [Tekst] / A.G. Tamrazyan // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. - 2014. - № 7. - S. 51-54.
10. Tamrazyan, A.G. Dinamicheskaya ustoychivost' szhatogo zhelezobetonno elementa kak vyazkouprugogo sterzhnya [Tekst] / A.G. Tamrazyan // Vestnik MGSU. - 2011. - № 1-2. - S.193-196.
11. Krylov, S.B. Raschetnyye soprotivleniya betona i stali v tsentral'no i vnetsentrenno szhatykh trubobetonnykh konstruktsiyakh [Tekst] / S.B. Krylov, P.P. Smirnov // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. - 2016. - №3. - S. 20-24
12. Lyudkovskiy, I.G. Prochnost' i deformativnost' trubobetonnykh elementov pri osevom szhatii [Tekst] / I.G. Lyudkovskiy, V.M. Fonov, A.P. Nesterovich // Beton i zhelezobeton. - 1989. - №1. - S.4-6
13. Krishan, A.L. Opredeleniye razrushayushchey nagruzki szhatykh trubobetonnykh elementov [Tekst] / A.L. Krishan, A.I. Zaikin, M.S. Kupfer // Beton i zhelezobeton. - 2008. - №2, - S.22-24
14. Krishan, A.L. Trubobetonnyye kolonny dlya vysotnykh zdaniy [Tekst] / A.L. Krishan, V.V. Remnev // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. - 2009. - №10. - S.22-24.

### A.G. Tamrazyan

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

Doctor of Techn. Science, Prof., Head of the Reinforced Concrete and Masonry Structures Department

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

### I.K. Manaenkov

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва

Post graduated student

E-mail: [manaenkov.i.k@gmail.com](mailto:manaenkov.i.k@gmail.com)

ТРАВУШ В.И., КОНИН Д.В., КРЫЛОВ А.С., КАПРИЕЛОВ С.С., ЧИЛИН И.А.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ НА ИЗГИБ

*Рассмотрены вопросы работы сталежелезобетонных конструкций на изгиб. Дано обоснование выбранной темы исследования. Представлено подробное описание и особенности жесткой и гибкой арматуры для исследуемых конструкций. Приведены особенности использованных при изготовлении моделей материалов и их характеристики. Дано обоснование выбранного типа фибры (стальная фибра прямого профиля) посредством определения подвижности бетонной смеси. Проведен анализ результатов, полученных при испытаниях на изгиб моделей сталежелезобетонных балок. Представлены общие виды и характер разрушения моделей, сформирована таблица разрушающих нагрузок. Проведена оценка существующих методик расчета, предложенных в [1, 2, 3], их сравнение с результатами эксперимента. Дана оценка эффективности применения стальной фибры прямого профиля в изгибаемых конструкциях, выполненных из высокопрочного бетона.*

**Ключевые слова:** бетон, сталь, фибробетон, сталежелезобетонная конструкция, жесткая арматура, гибкая арматура.

### 1. Введение

В 2015-2016 годах по заказу Ассоциации развития стального строительства разработан новый свод правил СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» [3]. При составлении документа, а также в рамках предварительной научно-исследовательской работы [4, 5] было установлено, что экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на изгиб, с использованием современных материалов за последние 20 лет практически не выполнялись. Кроме того, Ассоциацией развития стального строительства в 2017-2018 годах планируются к разработке ряд стандартов организаций, посвященных правилам проектирования сталежелезобетонных конструкций в развитие СП 266.1325800.2016 [3], что требует проведения ряда экспериментальных работ, связанных с непосредственным испытанием конструкций и моделей конструкций, а также численным моделированием работы композитных конструкций.

Вместе с тем, в последние годы в практике строительства в массовых объемах используются высокопрочные бетоны классов В80...В100, а также открылась перспектива применения сверхвысокопрочных бетонов, эффективность которых в композитных сталебетонных конструкциях недостаточно исследована.

Необходимость проведения настоящей работы обусловлена отсутствием действующих нормативно-технических документов, регламентирующих расчет сталежелезобетонных конструкций с применением высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов. Целью работы являлось: на основании проведенных испытаний оценить и, при необходимости, уточнить приведенные в [1, 2, 3] методики расчета железобетонных и сталежелезобетонных балок (бетонных балок с жесткой и гибкой арматурой) с процентом армирования 1,9...9,2%, запроектированных с использованием современных материалов – высокопрочных бетонов и фибробетона.

### 2. Описание испытанных моделей

В рамках работы были проведены испытания 21 модели балок прямоугольного поперечного сечения 200х150 мм длиной 1,5 м. Модели разделены на три группы.

1-ая группа моделей (9 шт.) выполнена сталежелезобетонными (рисунок 1) со стальным сердечником в виде двутавра, составленного из двух швеллеров №10 по ГОСТ 8240-97. Материал сердечника – сталь С255 по ГОСТ 27772-2015. Бетон моделей – высокопрочный класса по прочности на сжатие В75...В90. Верхняя арматура – диаметром 10 мм класса А400 из стали 35ГС. Поперечная арматура – диаметром 10 мм класса А400 из стали 35ГС, шаг –

60/120 мм. Процент армирования варьируется в пределах 7,8...9,2% (в зависимости от типа армирования).

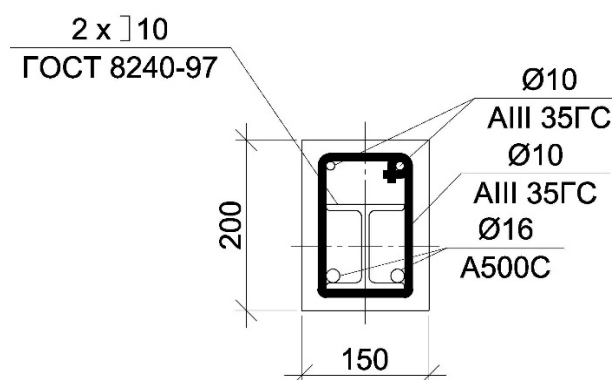
Для оценки совместной работы стального сердечника с бетоном, помимо поперечной арматуры в виде хомутов, в части моделей (строки 10...15 в таблице 1) предусмотрена установка дополнительной стержневой арматуры диаметром 16 мм класса А500С вдоль полок двутаврового профиля, соединенной с сердечником по всей длине сварным швом (рисунок 1).



а) жесткая и гибкая арматура (вид сверху)



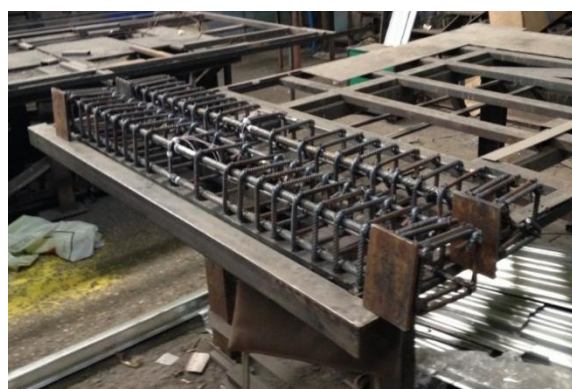
б) жесткая и гибкая арматура (вид сбоку)



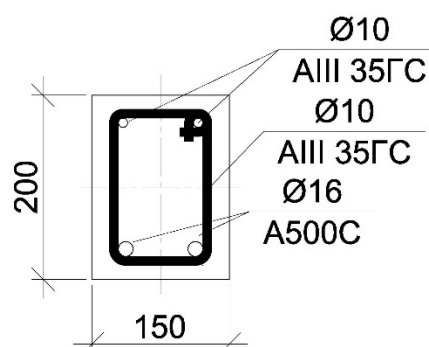
в) поперечное сечение

Рисунок 1 – Общий вид жесткой и гибкой арматуры балок группы 1

2-ая группа моделей (9 шт.) выполнена железобетонными с гибкой арматурой (рисунок 2). Бетон моделей – высокопрочный класса по прочности на сжатие В90 и фибробетон класса по прочности на сжатие В100...В130. Рабочая арматура: нижняя – диаметром 16 мм класса А500С, верхняя – диаметром 10 мм класса А400 из стали 35ГС. Поперечная арматура – диаметром 10 мм класса А400 из стали 35ГС, шаг – 60/120 мм. Процент армирования составляет 1,9%.



а) арматурные каркасы



б) поперечное сечение

Рисунок 2 – Общий вид арматуры балок группы 2

Для снижения эффекта хрупкого разрушения высокопрочных бетонов и уменьшения ширины раскрытия трещин в части моделей был применен фибробетон с самонапряжением.



3-ая группа моделей (3 шт.) выполнена из высокопрочного фибробетона без дополнительного армирования. Класс фибробетона по прочности на сжатие – В130.

Внутри каждой группы моделей были выделены партии по 3 однотипных балки, которые испытывались на одни и те же нагрузки, для обеспечения статистической достоверности полученных результатов.

Также для каждой партии заливки бетона и фибробетона было подготовлено по 3 образца-куба со стороной 10 см для определения прочностных характеристик материала на момент испытания. Для определения величины самонапряжения были подготовлены образцы – призмы размером 10x10x40 см, твердеющие в динамометрическом кондукторе, создающем в процессе расширения бетона образца упругое ограничение деформаций. В результате испытаний марка бетона по самонапряжению составила  $S_p2$ . Общий вид кондуктора приведен на рисунке 3.

Высокопрочный бетон класса по прочности на сжатие В75...В90 выполнен из распространённых в московском регионе материалов (цемент, песок, щебень, модификатор).

Свойства фибробетона подробно описаны в работе [6]. В основе технологии получения данного материала лежит совмещение сверхвысокопрочного бетона – матрицы и стальной фибры прямого профиля длиной 13 мм (временное сопротивление разрыву не менее 1200 МПа, модуль упругости 200 ГПа). Выбор такого профиля фибры обусловлен технологическими особенностями получения самоуплотняющегося сталефибробетона. Результаты определения подвижности бетонной смеси для фибры волнового и прямого профилей приведены на рисунке 4.



*Рисунок 3 – Общий вид динамометрического кондуктора для измерения величины самонапряжения бетона*



*а) фибра прямого профиля*



*б) фибра волнового профиля*

*Рисунок 4 – Определение подвижности бетонной смеси*

Применение стальной фибры прямого профиля обеспечивает сегрегационную устойчивость бетонной смеси при ее прохождении сквозь арматурный каркас и существенно улучшает удобоукладываемость.

### 3. Проведение испытаний

Для обеспечения достоверности полученных результатов испытания проводились в несколько этапов:

1 этап. Испытание пропорциональных образцов стали сердечника по ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» [7], а также стержневой арматуры. Получение данных о прочности материалов, диаграмм их работы для выполнения теоретических расчетов.

2 этап (основной). Испытание моделей групп 1, 2 и 3 с учетом положений ГОСТ 8829-94 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости» [8]. Испытания контрольных образцов-кубов проведены одновременно с испытаниями соответствующих моделей в соответствии с ГОСТ 10180-90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» [9].

Испытания моделей выполнены на тарированном прессе MAN500 – рисунок 5, моделирующем осевую нагрузку до 500 тс на испытательной базе ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (институт АО «НИЦ «Строительство»).

Нагружение производилось поэтапно ступенями не более 10% от контрольной нагрузки по прочности. На каждой ступени осуществлялась выдержка модели в течение 10 минут, а при достижении расчетной (контрольной) нагрузки – в течение 30 минут

Все модели балок испытывались на изгиб. Перед нагружением модели производилась выверка нагрузочных приспособлений относительно заранее нанесенных разметочных рисок на поверхности балки. Чистый изгиб в балке моделировался путем приложения нагрузки в 1/3 и 2/3 пролета (рисунок 6). Шарнирное опирание балки было обеспечено посредством ее установки на инвентарные шарнирно – подвижные опоры каткового типа (рисунок 7)

В процессе испытаний моделей на каждом шаге фиксировались: относительные деформации моделей, вертикальные абсолютные перемещения, значение вертикальной нагрузки, при которой произошло разрушение, либо деформации продолжали нарастать без увеличения нагрузки. Также фиксировалась картина развития трещин в моделях под нагрузкой и ширина их раскрытия.



Рисунок 5 – Общий вид испытательной установки

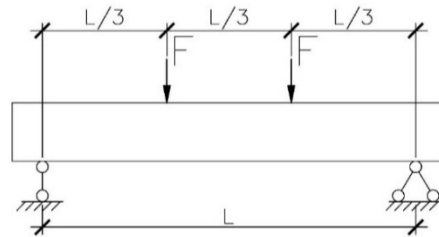


Рисунок 6 – Схема нагружения моделей



Рисунок 7 – Инвентарная шарнирно-подвижная опора

#### 4. Результаты испытаний

В процессе теоретической подготовки к эксперименту были вычислены величины предельных нагрузок на модели по [1, 2, 3].

Расчет по прочности сечений изгибаемых элементов произведен из условия:

$$M \leq M_{ult}, \quad (1)$$

где  $M$  – изгибающий момент от внешней нагрузки,

$M_{ult}$  – предельный изгибающий момент, который может быть воспринят сечением элемента.

Для моделей из сталежелезобетона (группа №1) определение предельного изгибающего момента выполнено согласно [3] по формулам 6.52, 6.53; для моделей из железобетона с гибкой арматурой (группа №2) – согласно [1] по формулам 8.3...8.5 и [2] по формулам 6.15, 6.18, 6.19; для моделей из фибробетона, армированных только стальной фиброй – по [2] по формулам 6.15...6.17. Причем, согласно СП 52-104-2009\* «Сталефибробетонные конструкции» [2] при определении предельного изгибающего момента для моделей, выполненных из фибробетона, была учтена работа бетона растянутой зоны.

Краткая информация об испытанных моделях, величины теоретических и фактических разрушающих нагрузок приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Характеристика моделей балок и результаты испытаний**

№ п/п	Обозначение модели	$\mu$ , % армирования	Материал сердечника	Бетон	Дополнительная анкеровка сердечника	Кубиковая прочность бетона на момент испытания, МПа	$M_{теор. пред}$	$M_{разр. экперим}$
							кНм	кНм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Б1.1	1.86	-	В90	-	112.8	49.11	54.11
2	Б1.2	1.86	-	В90	-	112.8	49.11	54.11
3	Б1.3	1.86	-	В90	-	112.8	49.11	52.49
4	Б2.1	1.86	-	ФБ, В130	-	158.6	72.48	58.11
5	Б2.2	1.86	-	ФБ, В130	-	158.6	72.48	65.48
6	Б2.3	1.86	-	ФБ, В130	-	158.6	72.48	66.21
7	Б3.1	-	-	ФБ, В130	-	157.4	25.70	20.53
8	Б3.2	-	-	ФБ, В130	-	157.4	25.70	19.39
9	Б3.3	-	-	ФБ, В130	-	157.4	25.70	17.67
10	Б4.1	9.13	C255	В90	продол. арматура	115.7	91.89	90.47
11	Б4.2	9.13	C255	В90		115.7	91.89	94.17
12	Б4.3	9.13	C255	В90		115.7	91.89	88.19
13	Б5.1	9.13	C255	В75	продол. арматура	96.4	86.62	85.14
14	Б5.2	9.13	C255	В75		96.4	86.62	94.17
15	Б5.3	9.13	C255	В75		96.4	86.62	86.66
16	Б6.1	7.79	C255	В90	-	117.5	71.01	71.46
17	Б6.2	7.79	C255	В90	-	117.5	71.01	77.54
18	Б6.3	7.79	C255	В90	-	117.5	71.01	82.10
19	Б7.1	1.86	-	ФБ с самонапр., В100	-	114.0	71.22	53.30
20	Б7.2	1.86	-	ФБ с самонапр., В100	-	114.0	71.22	50.07
21	Б7.3	1.86	-	ФБ с самонапр., В100	-	114.0	71.22	55.16

#### **Характер разрушения моделей:**

- Группа моделей №1: достижение предельной нагрузки в моделях с жесткой арматурой, выполненных из высокопрочного бетона, сопровождалось обильным трещинообразованием, в том числе наклонных трещин, с последующим сколом и расслоением бетона защитного слоя, расположенного в крайних третях пролета – между опорой и точкой приложения

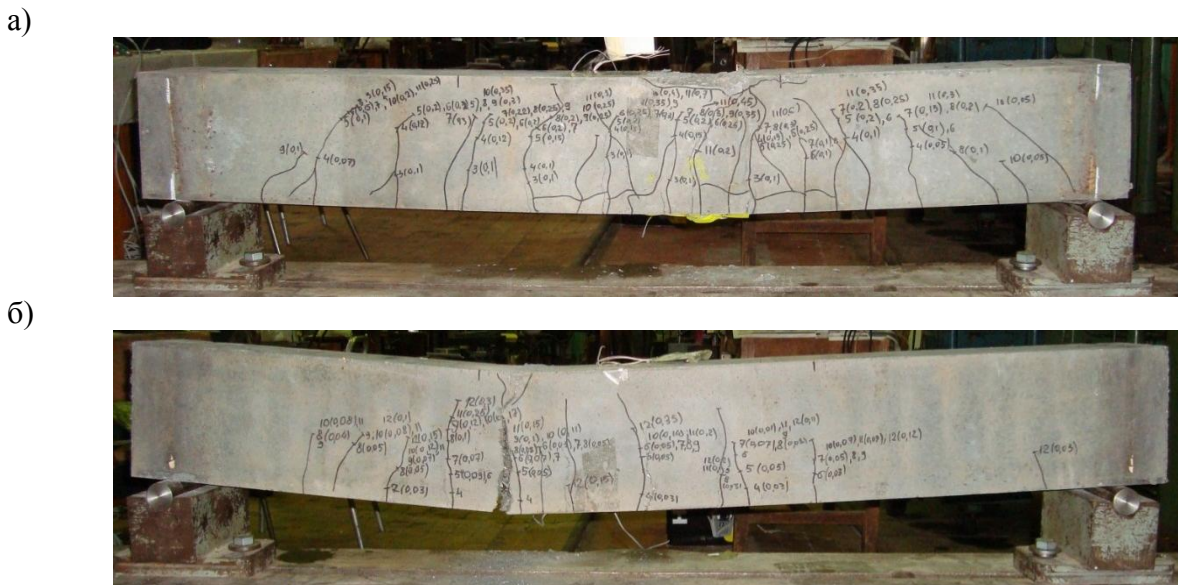


нагрузки (рисунки 8а, 8б). Предположительно, такой характер разрушения связан с переходом части жесткой арматуры в пластическое состояние, приводящее к ее существенным деформациям, и ее воздействием на бетонную часть модели.

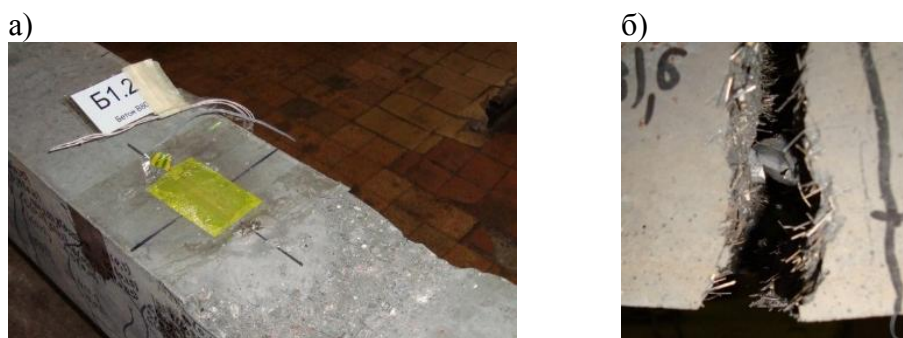


**Рисунок 8 – Разрушение моделей группы 1, выполненных из высокопрочного бетона:**  
а)общий вид, б) скол бетона защитного слоя

- Группа моделей №2: разрушение моделей с гибкой арматурой, выполненных из высокопрочного бетона, происходило по бетону сжатой зоны с характерным выколом в зоне чистого изгиба в верхней части балки (рисунки 9а, 10а). Разрушение моделей, выполненных из фибробетона без самонапряжения происходило вследствие разрыва растянутой арматуры (рисунки 9б, 10б); с самонапряжением – по бетону сжатой зоны со смятием в средней трети пролета, но без выколов и без разрыва арматуры.



**Рисунок 9 - Общий вид разрушения моделей группы 2, выполненных из высокопрочного бетона (а) и высокопрочного фибробетона (б)**



**Рисунок 10 – Общий вид разрушения моделей группы 2: а) выполненных из высокопрочного бетона (скол бетона сжатой зоны); б) выполненных из высокопрочного фибробетона (разрыв растянутой арматуры)**

- Группа моделей №3: разрушение внезапное, хрупкое. Предварительное трещинообразование почти отсутствовало (рисунок 11).

а)



б)



в)



Рисунок 11 – Общий вид разрушения моделей группы 3, выполненных из высокопрочного фибробетона

Из приведенных результатов можно заключить следующее:

1. Применение расчетных соотношений [1, 3] – для бетонов обычной прочности – в общем справедливо и для высокопрочных бетонов, что подтверждается на примере балок Б1, Б4...Б6 (табл. 1). Отличие между теоретической и фактической разрушающей нагрузками можно объяснить неучтенной в расчетах работой бетона растянутой зоны.
2. Разрушающие нагрузки для балок, выполненных из фибробетона и имеющих только дисперсное армирование, имеют существенные отклонения от теоретических величин, что говорит о необходимости дополнительного и более тщательного изучения условий работы рассмотренного материала и уточнения методики расчета конструкций выполненных из высокопрочного дисперсно-армированного бетона.
3. Для балок с жесткой арматурой фактические разрушающие нагрузки хорошо подтверждаются теоретическими расчетами, в которых использованы фактические характеристики материалов – максимальное расхождение (в среднем) составило 7,5%.

### Выводы

1. Проведен комплекс испытаний моделей железобетонных и сталежелезобетонных конструкций на изгиб. В общей сложности проведены испытания 21 модели, изготовленные с использованием современных бетонов и фибробетонов (по [6]) класса по прочности на сжатие В80...В130.
2. Достоверность полученных результатов испытаний обеспечена:
  - использованием поверенного прессового оборудования;
  - использованием материалов для моделей, соответствующих действующим нормативным документам;
  - проведением испытаний в соответствии с требованиями и рекомендациями соответствующих нормативных документов.

3. Применение расчетных соотношений [1, 3] – для бетонов обычной прочности – в общем справедливо и для высокопрочных бетонов. Однако, для получения более точной информации о несущей способности конструкций, выполненных из высокопрочных бетонов, требуется дальнейшее изучение учета влияния растянутого бетона на прочность сечения.

4. Сравнение разрушающих нагрузок на модели, выполненные из высокопрочного бетона и фибробетона (с близкими значениями кубиковой прочности бетона на сжатие – строки 1-3 и 19-21 табл. 1) показывает, что применение стальной фибры прямого профиля не оказывает существенного влияния на несущую способность элемента. В то же время, за счет применения стальной фибры ширина раскрытия трещин существенно уменьшается (до двух раз для одинаковых ступеней нагрузки).

5. Эффект от дисперсного армирования стальной фиброй значительно ниже, чем при стержневом армировании, которое играет решающую роль в обеспечении несущей способности изгибаемого элемента.

6. Изучение бетонных и железобетонных конструкций с применением фибробетона (рассмотренного в данной работе) требует отдельного внимания и дополнительных испытаний, так как его свойства и характер работы не вполне достоверно описываются известными нормативными методиками расчета [2]. Для увеличения несущей способности фибробетонных элементов, выполненных из высокопрочного бетона и работающих на изгиб (особенно с дисперсным армированием), возможно, следует рассматривать другие виды фибры – анкерную, волнистую.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003».
2. СП 52-104-2009\* «Сталефибробетонные конструкции».
3. СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования».
4. Травуш, В.И. Отечественный и зарубежный опыт исследований работы сталежелезобетонных конструкций на внецентренное сжатие [Текст] / В.И. Травуш, Д.В. Конин, Л.С. Рожкова, А.С. Крылов // Строительство и реконструкция. – 2016. – №5 (67). – С. 31-44.
5. СТО АРСС 11251254.001-2015 Сталежелезобетонные конструкции. Правила проектирования. – Ассоциация «Объединение участников бизнеса по развитию стального строительства. – М.: 2015. – 68 с.
6. Каприелов, С.С. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций [Текст] / С.С. Каприелов, И.А. Чилин // Строительные материалы. – М.: 2013. – № 7. – С. 28-30.
7. ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».
8. ГОСТ 8829-94 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости».
9. ГОСТ 10180-90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».
10. Мухамедиев, Т.А. Новое в нормировании сталефибробетона и расчетах сталефибробетонных конструкций [Текст] / Т.А. Мухамедиев, Б.С. Соколов // Строительные материалы. – М.: 2017. – №4. – С. 59-64.

**Травуш Владимир Ильич**  
 ЗАО «ГОРПРОЕКТ», г. Москва  
 Доктор технических наук,  
 профессор. Главный конструктор,  
 заместитель генерального  
 директора по научной работе.  
 Вице-президент РААСН  
 E-mail: [travush@mail.ru](mailto:travush@mail.ru)

**Конин Денис Владимирович**  
 АО "НИЦ "Строительство",  
 ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко,  
 г. Москва  
 Кандидат технических наук,  
 заведующий сектором ВЗиС  
 E-mail: [konden@inbox.ru](mailto:konden@inbox.ru)

**Чилин Игорь Анатольевич**  
 АО "НИЦ "Строительство",  
 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева,  
 г. Москва  
 Старший научный сотрудник  
 E-mail: [pgsnik87@mail.ru](mailto:pgsnik87@mail.ru)

**Каприелов Семен Суменович**  
 АО "НИЦ "Строительство",  
 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева,  
 г. Москва  
 Доктор технических наук,  
 заведующий лабораторией.  
 Член – корреспондент РААСН  
 E-mail: [kapriellov@mail.ru](mailto:kapriellov@mail.ru)

**Крылов Алексей Сергеевич**  
 АО "НИЦ "Строительство",  
 ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко,  
 г. Москва  
 Научный сотрудник  
 E-mail: [kryl07@mail.ru](mailto:kryl07@mail.ru)



V. I. TRAVUSH, D. V. KONIN, A. S. KRYLOV, S. S. KAPRIELOV, I. A. CHILIN

## EXPERIMENTAL STUDY OF COMPOSITE STRUCTURES FOR BENDING ELEMENTS

*Considered the issues of rigid reinforcement structures in bending. The substantiation of the selected theme of research is given. Detailed description and features of rigid and bar reinforcement for the studied structures are presented. Features of the models of materials used at manufacturing and their characteristics are resulted. The substantiation of the selected type of a fiber (a steel fiber straight a profile) by means of definition of mobility of a concrete mix is given. The analysis of the results of bending tests of models of steel-concrete composite beams obtained. General views and character of destruction of models are presented, the table of breaking loads is generated. The evaluation of existing calculation methods proposed in [1, 2, 3] and their comparison with the experimental results is fulfilled. It is estimated the efficiency of application of steel fiber straight profile in bending structures made of high-strength concrete.*

**Keywords:** concrete, steel, fiber reinforced concrete, rigid reinforcement structure, rigid reinforcement, bar reinforcement.

## BIBLIOGRAPHY

1. SP 63.13330.2012 «Betonnnyye i zhelezobetonnyye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 52-01-2003».
2. SP 52-104-2009\* «Stalefibrobetonnyye konstruksii».
3. SP 266.1325800.2016 «Konstruksii stalezhelezobetonnyye. Pravila proyektirovaniya».
4. Travush, V.I. Otechestvennyy i zarubezhnyy opyt issledovaniy raboty stalezhelezobetonnykh konstruksiy na vnestsentrennoye szhatiye [Tekst] / V.I. Travush, D.V. Konin, L.S. Rozhkova, A.S. Krylov // Stroitel'stvo i rekonstruksiya. – 2016. – №5 (67). – S. 31-44.
5. STO ARSS 11251254.001-2015 Stalezhelezobetonnyye konstruksii. Pravila proyektirovaniya. – Assotsiatsiya «Ob'yedineniye uchastnikov biznesa po razvitiyu stal'nogo stroitel'stva. – M.: 2015. – 68 s.
6. Kapriyelov, S.S. Sverkhvysokoprochnyy samouplotnyayushchiysya fibrobeton dlya monolitnykh konstruksiy [Tekst] / S.S. Kapriyelov, I.A. Chilin // Stroitel'nyye materialy. – M.: 2013. – № 7. – S. 28-30.
7. GOST 1497-84 «Metally. Metody ispytaniy na rastyazheniye».
8. GOST 8829-94 «Izdeliya stroitel'nyye zhelezobetonnyye i betonnyye zavodskogo izgotovleniya. Metody ispytaniy nagruzheniyem. Pravila otsenki prochnosti, zhestkosti i treshchinostoykosti».
9. GOST 10180-90 «Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obraztsam».
10. Mukhamediyev, T.A. Novoye v normirovanii stalefibrobetona i raschetakh stalefibrobetonnykh konstruksiy [Tekst] / T.A. Mukhamediyev, B.S. Sokolov // Stroitel'nyye materialy. – M.: 2017. – №4. – S. 59-64.

### V.I. Travush

GORPROJECT, Moscow  
Doctor of technical Sciences,  
Professor. Chief designer, Deputy  
General Director on scientific work.  
Vice-President of Russian Academy  
of architecture and construction  
Sciences  
E-mail: [travush@mail.ru](mailto:travush@mail.ru)

### D.V. Konin

Research Center of Construction  
TSNIISK named after V.A. Kouchere-  
renko, Moscow  
Candidate of technical Sciences,  
Chief manager of Sector HRB&C  
E-mail: [konden@inbox.ru](mailto:konden@inbox.ru)

### Chilin Igor Anatolevich

Research Center of Construction  
NII ZHB n.aft. A.A. Gvozdev,  
Moscow  
Senior researcher  
E-mail: [pgsnik87@mail.ru](mailto:pgsnik87@mail.ru)

### S.S. Kapriyelov

Research Center of Construction  
NII ZHB n.aft. A.A. Gvozdev,  
Moscow  
Doctor of technical Sciences,  
head of laboratory. Corresponding  
member of the Russian Academy  
of architecture and construction  
Sciences  
E-mail: [kapriyelov@mail.ru](mailto:kapriyelov@mail.ru)

### A.S. Krylov

Research Center of Construction  
TSNIISK named after  
V.A. Koucherenko, Moscow  
Researcher  
E-mail: [kryl07@mail.ru](mailto:kryl07@mail.ru)

ТРЕЩЁВ А.А., РОМАШИНА А.В.

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛАСТИНЫ С КРУГЛЫМ ОТВЕРСТИЕМ ИЗ МАТЕРИАЛА С УСЛОЖНЁННЫМИ СВОЙСТВАМИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

*В статье произведена постановка задачи типа Кириша для пластины конечных размеров с круглым отверстием из ортотропного разносопротивляющегося материала, адаптированы определяющие соотношения, представленные в монографии А.А. Трещева [1] для данного класса задач, приведён вывод разрешающих уравнений. На основе построенной модели с использованием метода конечных элементов решена конкретная задача. В статье представлены наиболее характерные данные исследования НДС пластины и выполнено сравнение результатов расчета по классической теории при постоянных механических характеристиках с результатами, полученными по предложенной модели с учетом разносопротивляемости.*

**Ключевые слова:** задача Кириша, круглое отверстие, одноосное растяжение, плоское напряжение, ортотропный разносопротивляющийся материал, концентрация напряжений.

Многие новые анизотропные конструкционные материалы не подчиняются классическим законам их упругопластического деформирования твердых тел, основанным на гипотезе единой кривой «интенсивность напряжений - интенсивность деформаций». Механические свойства этих материалов зависят от вида напряженного состояния, у них могут проявляться зависимость механических характеристик от вида напряженного состояния. Подобными свойствами обладает ряд полимеров, графиты и композиты. Важно также учесть тот факт, что ввиду конструктивных, технологических, экологических и других требований приходится нарушать сплошность элементов строительных конструкций путем устройства отверстий, пазов, вырезов и т. п. В процессе эксплуатации конструкции эти несплошности становятся местами концентрации напряжений. Концентрация напряжений является одним из главных факторов, влияющих на прочность перфорированных элементов, поэтому исследование влияния концентраторов на напряженно-деформированное состояние конструктивных элементов из анизотропных разносопротивляющихся материалов является актуальной задачей строительной отрасли.

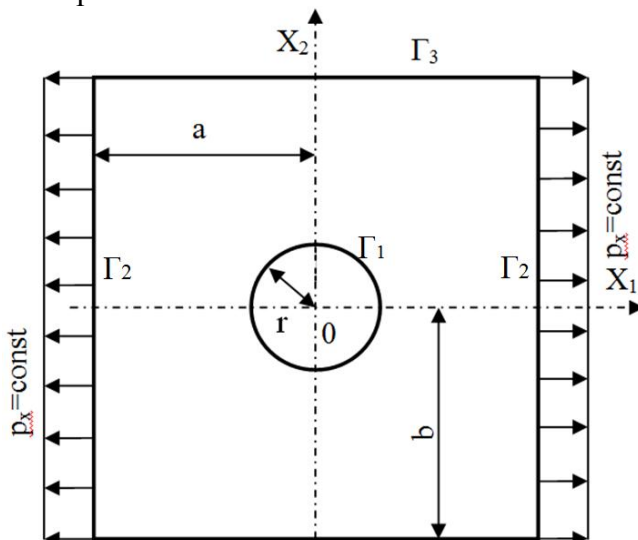


Рисунок 1 – Расчетная схема пластины

Для построения модели задачи исследования в данной статье рассматривается тонкая физически нелинейная пластина с отверстием радиусом  $r$  и толщиной  $h$  в направлении оси  $X_3$ , находящаяся в равновесии. Она имеет конечные размеры  $2a$  и  $2b$  по направлению основных осей декартовой системы координат  $X_1$  и  $X_2$  и нагружена в своей плоскости растягивающей равномерно распределённой по толщине нагрузкой  $p_x$ , которая приложена к внешнему контуру  $\Gamma_2$  в соответствии с рисунком 1. Нагружение принято пропорциональным при активной деформации, в связи с чем для описания свойств материала принимаются уравнения состояния, представленные через параметры нормированного пространства напряжений [1].

Функции, описывающие напряженно-деформированное состояние, зависят только от координат  $X_1$  и  $X_2$ . Вектор перемещений имеет две ненулевые составляющие  $u_1 = u$  и  $u_2 = v$  в направлении соответствующих осей. Перемещения  $u_3 = w$  в направлении оси  $X_3$  есть, но они имеют второстепенное значение и определяются после решения задачи по формуле:  $w = e_{33}x_3$ . Деформации  $e_{33}$  не зависят от координаты  $X_3$  и малы настолько, что далее не рассматриваются.

Уравнения связи между основными компонентами тензора малой деформации и перемещениями в рамках теории механики сплошных сред, строительной механики и в условиях плоского напряженного состояния принимаются для пластинки в виде:

$$e_{11} = u_{,1}; \quad e_{22} = v_{,2}; \quad \gamma_{12} = u_{,2} + v_{,1}. \quad (1)$$

По всей толщине пластинки и на её плоских поверхностях справедливо равенство:

$$\sigma_{33} = \tau_{13} = \tau_{23} = 0 \quad (2)$$

В состоянии плоского напряженного состояния в ортотропном теле через каждую точку проходят две перпендикулярные плоскости упругой симметрии, в силу чего на основании закона деформирования для разносопротивляющегося материала существуют зависимости [1]:

$$e_{11} = (A_{1111} + B_{1111} \cdot \alpha_{11}) \cdot \sigma_{11} + (A_{1122} + B_{1122} \cdot (\alpha_{11} + \alpha_{22})) \cdot \sigma_{22};$$

$$e_{22} = (A_{1122} + B_{1122} \cdot (\alpha_{11} + \alpha_{22})) \cdot \sigma_{11} + (A_{2222} + B_{2222} \cdot \alpha_{22}) \cdot \sigma_{22};$$

$$\gamma_{12} = (A_{1212} + B_{1212} \cdot \sqrt{2} \cdot \alpha_{12}) \cdot \tau_{12}.$$

Уравнения связи между компонентами тензора малых деформаций и напряжениями в условиях плоского напряжения с учетом равенства (2) в форме метода «переменных параметров упругости» Биргера приводятся к виду [2]:

$$\{e\} = [C] \{\sigma\}, \quad (3)$$

где  $\{e\} = \{e_{11} e_{22} \gamma_{12}\}^T$  – вектор-столбец ненулевых деформаций;

$[C]$  – матрица податливостей ортотропного разносопротивляющегося материала, зависящих от вида напряженного состояния;

$\{\sigma\} = \{\sigma_{11} \sigma_{22} \tau_{12}\}^T$  – вектор-столбец ненулевых напряжений.

Компоненты матрица податливостей  $[C]$  определяются через тензорные параметры [1]:

$$C_{11} = A_{1111} + B_{1111} \cdot \alpha_{11}, \quad C_{12} = C_{21} = A_{1122} + B_{1122} \cdot (\alpha_{11} + \alpha_{22}), \quad C_{13} = C_{31} = C_{32} = C_{23} = 0$$

$$C_{22} = A_{2222} + B_{2222} \cdot \alpha_{22}, \quad C_{33} = A_{1212} + B_{1212} \cdot \sqrt{2} \cdot \alpha_{12},$$

где  $A_{ijkl}$ ,  $B_{ijkl}$  – константы, определяемые из экспериментов по одноосному растяжению и сжатию образцов материала в направлениях вдоль главных осей анизотропии и под углом  $45^\circ$  к ним [1];

$\alpha_{ij}$  – нормированные напряжения, причем  $\alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S = \sigma_{ij} / \sqrt{\sigma_{ij} \cdot \sigma_{ij}}$  [1].

Независимых констант при решении поставленной задачи будет 8 и они запишутся так [1]:

$$A_{1111} = 0,5 \cdot (1/E_1^+ + 1/E_1^-); \quad B_{1111} = 0,5 \cdot (1/E_1^+ - 1/E_1^-); \quad A_{2222} = 0,5 \cdot (1/E_2^+ + 1/E_2^-);$$

$$B_{2222} = 0,5 \cdot (1/E_2^+ - 1/E_2^-); \quad A_{1122} = -0,5 \cdot (v_{12}^+ / E_1^+ + v_{12}^- / E_2^-);$$

$$B_{1122} = -0,5 \cdot (v_{12}^+ / E_1^+ - v_{12}^- / E_2^-); \quad A_{1212} = \left(1/E_{12}^+ + 1/E_{12}^-\right) - \frac{1}{4} \left( \left[1/E_1^+ + 1/E_2^+ + \right. \right.$$

$$+1/E_1^- + 1/E_2^-] - 2 \left[ v_{21}^+ / E_1^+ + v_{21}^- / E_1^- \right] \Bigg);$$

$$B_{1212} = \sqrt{2} \left( 1/E_{12}^+ - 1/E_{12}^- \right) - 0,125 \cdot \sqrt{2} \left( \left[ 1/E_1^+ + 1/E_2^+ - 1/E_1^- - 1/E_2^- \right] - \right.$$

$$\left. - 4 \left( v_{21}^+ / E_1^+ - v_{21}^- / E_1^- \right) \right); v_{ij}^+ / E_j^+ = v_{ji}^+ / E_i^+; v_{ij}^- / E_j^- = v_{ji}^- / E_i^-, (i, j = 1, 2),$$

где  $E_j^\pm$  – модули упругости при растяжении и сжатии в направлениях соответствующих главным осям анизотропии;

$v_{ij}^\pm$  – коэффициенты поперечной деформации при растяжении и сжатии в соответствующих направлениях к главным осям анизотропии;

$E_{ij}^\pm$  – модули упругости при растяжении и сжатии в направлениях под углом  $45^\circ$  к соответствующим главным осям анизотропии.

Преобразование уравнения (3) с учетом соотношений (1) позволяет получить зависимость между напряжениями и деформациями при плоском напряженном состоянии:

$$\{\sigma\} = [D(\alpha_{ij})] \{e\}, \quad (4)$$

где  $[D(\alpha_{ij})] = [C]^{-1}$  – матрица жесткостей материала, зависящая от вида напряженного состояния.

Основные положения и зависимости классической теории упругости остаются справедливыми, поскольку при использовании тех или иных физических соотношений мы не меняем статико-геометрическую природу задачи. Для данной задачи уравнения равновесия при условном отсутствии объемных сил представляются следующим образом [3]:

$$\sigma_{11,1} + \tau_{12,2} = 0; \quad \tau_{12,1} + \sigma_{22,2} = 0. \quad (5)$$

При статических граничных условиях на контуре пластинки имеем:

$$p_{1v} = \sigma_{11} \cos(vx_1) + \tau_{12} \cos(vx_2);$$

$$p_{2v} = \sigma_{22} \cos(vx_2) + \tau_{12} \cos(vx_1), \quad (6)$$

где  $\cos(vx_k)$  – косинусы углов между осями  $x_k$  и внешней нормалью к площадке, на которую действуют усилия с проекциями  $p_{kv}$ , ( $k = 1, 2$ ).

Очевидно, что сохраняется одно из общих уравнений неразрывности деформаций Сен-Венана:

$$e_{11,22} + e_{22,11} = \gamma_{12,12} \quad (7)$$

Выражения (1), (4), (5) содержат восемь уравнений с восьмью неизвестными, которые решаются по методу сил или по методу перемещений. С другой стороны, можно использовать метод сил, заменив в зависимостях (7) деформации через напряжения (3) и в сочетании с уравнениями равновесия (5) получить систему трех уравнений, имеющую три неизвестных напряжения. При этом третье уравнение из разрешающей системы имеет вид:

$$C_{33}\tau_{12,12} + C_{33,12}\tau_{12} + C_{33,2}\tau_{12,1} + C_{33,1}\tau_{12,2} = (C_{11,22} + C_{12,11})\sigma_{11} + (C_{12,22} + C_{22,11})\sigma_{22} + C_{11} \times$$

$$\times \sigma_{11,22} + C_{12}(\sigma_{11,11} + \sigma_{22,22}) + C_{22}\sigma_{22,11} + 2(C_{11,2}\sigma_{11,2} + C_{12,2}\sigma_{22,2} + C_{12,1}\sigma_{11,1} + C_{22,1}\sigma_{22,1}). \quad (8)$$

Для метода перемещений в два уравнения равновесия (5) подставляем выражения напряжений (4), в которых сразу заменяем деформации согласно зависимостям (1). В результате этих преобразований получаем два уравнения с двумя неизвестными перемещениями [4]:

$$D_{11}u_{,11} + D_{11,1}u_{,1} + D_{12}v_{,12} + D_{12,1}v_{,2} + D_{33}(u_{,22} + v_{,12}) + D_{33,2}(u_{,2} + v_{,1}) = 0,$$

$$D_{22}v_{,22} + D_{22,2}v_{,2} + D_{12}u_{,12} + D_{12,2}u_{,1} + D_{33}(u_{,12} + v_{,22}) + D_{33,1}(u_{,2} + v_{,1}) = 0, \quad (9)$$

где  $D_{ij}$  – компоненты матрицы жесткостей материала.

Для решения задачи принимается плоская конечно-элементная модель с двумя степенями свободы в узле. Вся область, ограниченная контуром пластинки покрывается треугольными симплекс конечными элементами [4]. В предполагаемом месте концентрации напряжений, т. е. около отверстия сетка конечных элементов сгущается. Перемещения в произвольной точке элемента  $u(x_1, x_2)$  и  $v(x_1, x_2)$  через перемещения узлов элемента  $\{U\}$  представляются следующим образом:

$$\{u \ v\}^T = [N]\{U\}, \quad (10)$$

где  $\{U\} = \{u_i \ v_i \ u_j \ v_j \ u_k \ v_k\}^T$ ;  $i, j, k$  – номера узлов конечного элемента.

Поля перемещений в пределах выбранного в задаче треугольного элемента определяются с помощью интерполяционного полинома первой степени [5]:  $u = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 x_2$ ;  $v = \alpha_4 + \alpha_5 x_1 + \alpha_6 x_2$ , а функции формы  $[N]$  принимаются в виде:

$$[N] = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_k & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_k \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где  $N_i = (a_i + b_i x_1 + c_i x_2)/(2\Delta)$ ,  $(i \rightarrow j \rightarrow k)$ ,  $\Delta$  – площадь треугольного элемента;  $a_i = x_{1j}x_{2k} - x_{1k}x_{2j}$ ;  $b_i = x_{1i} - x_{2k}$ ;  $c_i = x_{1k} - x_{2j}$ .

Используя уравнения (1) и продифференцированную соответствующим образом матрицу  $[N]$ , получим зависимости между деформациями элемента и перемещениями его узлов:

$$\{e\} = [B]\{U\}, \quad (12)$$

$$\text{где } [B] = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_k \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_k & b_k \end{bmatrix}; \quad 2\Delta = \det \begin{vmatrix} 1 & x_{1i} & x_{2i} \\ 1 & x_{1j} & x_{2j} \\ 1 & x_{1k} & x_{2k} \end{vmatrix}.$$

Связь между напряжениями и деформациями в матричной форме принимается в виде (4). Формулировка принятого МКЭ основана на вариационном принципе возможных перемещений Лагранжа. Потенциальная энергия тела  $\Pi$  представляет собой разность внутренней энергии деформации  $W$  и работы внешних сил  $A$ :  $\Pi = W - A$ . Энергия деформации элемента объема  $dV$  определяется по формуле:  $dW = \{e\}^T \{\sigma\}/2$ . Без учета массовых сил для выражения работы внешних сосредоточенных и поверхностных сил имеем:

$$A = \{U\}^T \{P\} + \int_S \{U\}^T [N]^T \{p\} dS, \quad (13)$$

где  $\{P\}$  – вектор внешней узловой нагрузки в проекциях на оси декартовой системы координат;

$\{p\}$  – вектор внешней поверхностной нагрузки в проекциях на оси декартовой системы координат;

$S$  – контур внешней границы конечного элемента.

Потенциальная энергия конечного элемента преобразуется к виду:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \{e\}^T \{\sigma\} dV - \{U\}^T \{P\} - \int_S \{U\}^T [N]^T \{p\} dS \quad (14)$$

а с учетом формул (13) и (5) к виду:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \{U\}^T [B]^T [D(\sigma)] [B] \{U\} dV - \{U\}^T \{P\} - \int_S \{U\}^T [N]^T \{p\} dS. \quad (15)$$

Для плоского напряженного состояния конечного элемента с толщиной  $h$  получается следующее общее уравнение метода конечных элементов (после минимизации функционала (15) по вектору  $\{U\}$  и приведения распределенной поверхностной нагрузки к сосредоточенным узловым силам):

$$[K]\{U\} = \{P\}, \quad (16)$$

где  $[K] = [B]^T [D(\sigma)] [B] h \Delta$  – матрица жесткости конечного элемента.

Векторы  $\{U\}$ ,  $\{P\}$  (16) рассматриваются как вектор неизвестных узловых перемещений и вектор внешней узловой нагрузки на пластину.

Решение системы алгебраических уравнений рассматриваемой задачи с учетом глобальной матрицы жесткости, полученной сложением матриц жесткости отдельных конечных элементов, и соответствующих граничных условий производится методом Гаусса. Исходная нелинейная задача решается методом «переменных параметров упругости» в сочетании с пошаговыми нагружениями.

На каждом шаге нагружения параметры напряженно-деформированного состояния твердого тела уточняются итерационно с проверкой сходимости вычислительного процесса. Сходимость оценивалась по величинам узловых перемещений смежных этапов приближения:

$$\left| (\{U\}^k - \{U\}^{k-1}) / \{U\}^{k-1} \right| < \delta_u, \quad (17)$$

где  $k$  – номер итерации;  $\delta_u$  – устанавливаемая точность  $\delta_u = 0,001$ .

В качестве объекта расчета выбрана квадратная пластина размером  $120 \times 120$  мм, толщиной  $h = 20$  мм с круговым отверстием диаметром 40 мм, нагруженная растягивающей равномерно распределенной по толщине нагрузкой интенсивностью  $P$  (см. рисунок 1) и выполненная из трехармированного тканного полимера П36-50 с характеристиками, представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Константы материала П36-50 [6]

$E_1^+$	$E_1^-$	$E_2^+$	$E_2^-$	$\nu_{12}^+$	$\nu_{12}^-$	$E_{12}^+$	$E_{12}^-$	$\nu_{21}^+$	$\nu_{21}^-$	$G_{12}$
10,3 ГПа	11,77 ГПа	17,6 ГПа	18,54 ГПа	0,188	0,215	5,25 ГПа	5,47 ГПа	0,110	0,136	3,14 ГПа

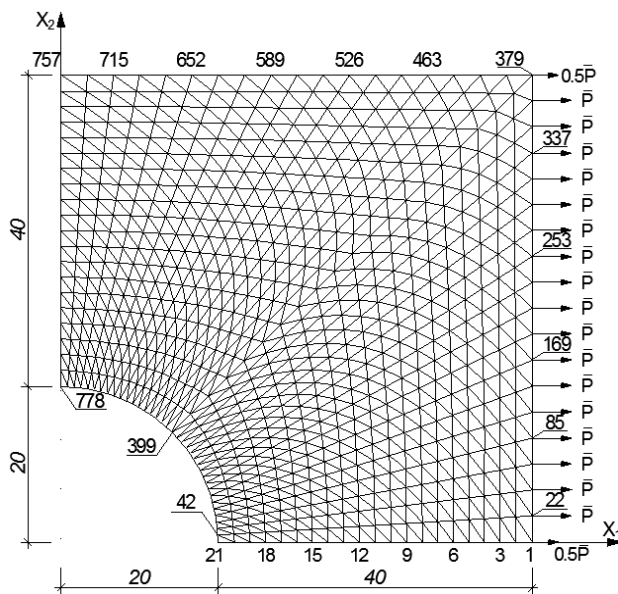


Рисунок 2 – Расчетная схема задачи с сеткой конечных элементов

Принимая во внимание симметричность задачи, в расчете рассматривалась четвертая часть пластины, а отброшенные части заменялись соответствующими граничными условиями симметрии [7, 8]. Расчетная схема задачи с разбиением на конечные элементы приведена на рисунке 2 (числами обозначена нумерация узлов). Количество треугольных конечных элементов составило 1440 шт., число узлов – 778 шт. Решение задачи представлено на рисунке 3.

Для анализа результатов были приняты три характерных значения нагрузки с интенсивностью  $P_1 = 6$  МПа,  $P_2 = 12$  МПа,  $P_3 = 18$  МПа. Такой выбор основывался на том, чтобы оценить влияние усложнённых механических свойств трехармированного тканного полимерного композита П36-50 на разных уровнях их

проявления. Интенсивности нагрузки  $P_1$  на рисунке 3 соответствуют кривые, обозначенные цифрой 1,  $P_2$  – цифрой 2,  $P_3$  – цифрой 3. Распределение напряжений, представленное на ри-



сунке 3 сплошными кривыми соответствует классическому решению для ортотропных материалов. Штриховые кривые соответствуют решениям, полученным на основе разработанной в данной работе математической модели, учитывающей разнсопротивляемость материала.

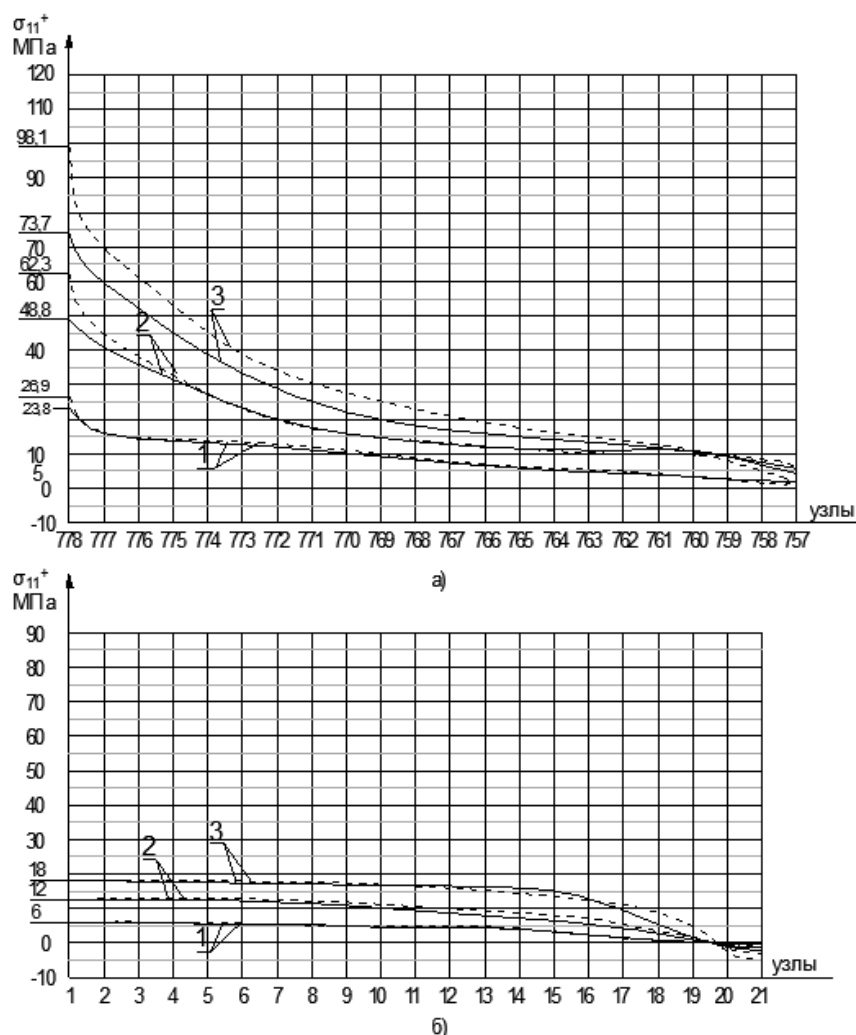


Рисунок 3 – Нормальные напряжения вдоль  $X_1$  при растяжении: а) по узлам 757-778; б) по узлам 1-21

На рис. 3а и 3б видно, что при нагружении с интенсивностью  $P_1$  при деформировании слабо проявляются свойства разнсопротивляемости композита П36-50. При этом уровне нагрузки напряжения  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{22}$  слабо отличаются от данных классической теории для ортотропных материалов. Около отверстия, непосредственно в зоне концентрации напряжений разница в значениях напряжений  $\sigma_{11}$  при уровне нагрузки  $P_1$  не превышает 13,03%, при  $P_2$  – 27,66%, при  $P_3$  – 33,12%. По мере увеличения действующей нагрузки влияние разнсопротивляемости полимера на распределение напряжений прослеживается более явно и становится существенным.

Разница напряжений  $\sigma_{22}$  в аналогичной зоне может достигать 42,3%, но величины этих напряжений существенно ниже  $\sigma_{11}$  (в 2-3 раза).

Результаты решения задачи о концентрации напряжений около отверстия без учета разнсопротивляемости материала, полученные с помощью представленной в данной работе математической модели (при обнулении нелинейных членов), и решение, полученное для ортотропного материала с помощью конечно-элементного пакета ANSYS 16.0, неплохо согласу-

ются между собой. Разница в полученных результатах для  $\sigma_{11}$  в зоне концентрации не превышает 6,8%. Данные сравнения подтверждают реальность и физическую непротиворечивость построенной модели.

Неучет явления разнсопротивляемости приводит к значительным погрешностям при вычислении основных характеристик напряженно–деформированного состояния перфорированных элементов строительных конструкций. Для получения достоверных результатов инженерных расчетов и для предотвращения возникновения аварийных состояний элементов конструкций и сооружений необходимо учитывать влияние усложнённых свойств материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трещев, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения: монография / А.А.Трещев. – М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. – 328 с.
2. Петров, В.В. Методы расчета конструкций из нелинейно-деформируемого материала: учеб. пособие / В.В.Петров, И.В.Кривошеин. – М: Изд-во АСВ, 2009. – 208 с.
3. Амбарцумян, С.А. Разномодульная теория упругости / С.А.Амбарцумян. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
4. Неделин, А.В. Напряженное состояние пластинки из дилатирующего материала, ослабленного отверстием / А.В.Неделин, А.А.Трещев // Известия вузов. Строительство. – 2001. – №8. – С. 16–20.
5. Даутов, Р.З. Программирование МКЭ в MATLAB / Р.З.Даутов. – Казань: Изд-во КГУ, 2010. – 71 с.
6. Розе, А.В. Трехармированные тканые материалы/ А.В.Розе, И.Г.Жигун, М.Н.Душин // Механика полимеров, 1970. №3. –С. 471–476.
7. Трещев, А.А. Решение задачи типа Кирша для пластины из анизотропного разнсопротивляющегося материала / А.А.Трещев, А.В.Морозова // Научный вестник ВГАСУ. Сер. Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – Воронеж, ВГАСУ, 2015. – вып.1. – С. 72–79.
8. Ромашина, А.В. Задача типа Кирша для ортотропного разнсопротивляющегося материала / А.В.Ромашина, А.А.Трещев // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела: сб. тр. конференции. – Тверь: Изд-во ТверьГТУ, 2015. – С. 225–230.

**Трещёв Александр Анатольевич**

Тульский государственный университет, г. Тула

Д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Строительство, строительные материалы и конструкции»

E-mail: [taa58@yandex.ru](mailto:taa58@yandex.ru)

**Ромашина Анастасия Викторовна**

Тульский государственный университет, г. Тула

Аспирант кафедры «Строительство, строительные материалы и конструкции»

E-mail: [rediso4kkka@mail.ru](mailto:rediso4kkka@mail.ru)

---

A.A. TRESHCHEV, A.V. ROMASHINA

## THE STRESS-STRAIN STATE OF A PLATE WITH A ROUND HOLE FROM A MATERIAL WITH COMPLEX PROPERTIES TENSILE

*In the article, raising the solution of the task like the Kirsch's problem is produced for the plate with circular hole made of orthotropic material with multimodulus behavior. The defining relations submitted in the monograph of A.A. Treshchov [1] are adapted for this class of problems. The article contains the conclusion of resolving equations. The concrete problem was decided on the basis of the built model with the use of method of finite elements. The article presents the most characteristic data research stress-strain state of plates. The results of calculations by the classical theory for constant mechanical characteristics had been compared with the results of the proposed model taking into account multimodulus behavior.*

**Keywords:** Kirsch's problem, circular hole, monoaxial stretching, flat tension, ortotropic material with multimodulus behavior, concentration of tension.

## BIBLIOGRAPHY

1. Treshchev A.A., Teoriya deformirovaniya i prochnosti materialov s iznachal'noy ili navedennoy chuvstvitel'nost'yu k vidu napryazhennogo sostoyaniya. Opredelyayushchiye sootnosheniya: monografiya / A.A.Treshchev. – M.; Tula: RAASN; TulGU, 2016. – 328 s.
2. Petrov V.V., Metody rascheta konstruktsiy iz nelineyno-deformiruyemogo materiala: ucheb. posobiye / V.V.Petrov, I.V.Krivoshein. – M: Izd-vo ASV, 2009. – 208 s.
3. Ambartsumyan S.A. Raznomodul'naya teoriya uprugosti / S.A.Ambartsumyan. – M.: Nauka, 1982. – 320 s.
4. Nedelin A.V., Napryazhennoye sostoyaniye plastinki iz dilatiruyushchego materiala, oslablennogo otverstiyem / A.V.Nedelin, A.A.Treshchev // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. – 2001. – №8. – S. 16–20.
5. Dautov R.Z. Programirovaniye MKE v MATLAB / R.Z.Dautov. – Kazan': Izd-vo KGU, 2010. – 71 s.
6. Roze A.V., Trekharmirovannyye tkannyye materialy/ A.V.Roze, I.G.Zhigun, M.N.Dushin // Mekhanika polimerov, 1970. №3. –S. 471–476.
7. Treshchev A.A., Resheniye zadachi tipa Kirsha dlya plastiny iz anizotropnogo raznosoprotivlyayushchegosya materiala / A.A.Treshchev, A.V.Morozova // Nauchnyy vestnik VGASU. Ser. Fiziko-khimicheskiye problemy i vysokkiye tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya. – Voronezh, VGASU, 2015. – vyp.1. – S. 72–79.
8. Romashina A.V., Zadacha tipa Kirsha dlya ortotropnogo raznosoprotivlyayushchegosya materiala / A.V.Romashina, A.A.Treshchev // Problemy prochnosti, plastichnosti i ustoychivosti v mekhanike deformiruyemogo tverdogo tela: sb. tr. konferentsii. – Tver': Izd-vo Tver'GTU, 2015. – S. 225–230.

### **A.A. Treshchev**

Tula state university, Tula

Doctor of tech. sciences, prof., head of the department “Building, construction materials and structures”

E-mail: [taa58@yandex.ru](mailto:taa58@yandex.ru)

### **A.V. Romashina**

Tula state university, Tula

Postgraduate student of the department “Building, construction materials and structures”

E-mail: [rediso4kkka@mail.ru](mailto:rediso4kkka@mail.ru)

ФЕДОРОВ В.С., ШАВЫКИНА М.В., ЮСУПОВА Е.В.

## ПРОГИБЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРЕДЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

*В статье приведено развитие известной расчетной модели деформирования изгибаемого железобетонного элемента. Изложена методика расчета прогибов железобетонных конструкций при нагрузках, превышающих нормативные значения, позволяющая оценить напряженно-деформированное состояние конструкции и его близость к возможному моменту разрушения. В основу расчета кривизны, определяющих прогибы железобетонных конструкций, положена нелинейная деформационная модель, рекомендованная СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», что позволяет учесть особенности и условия работы: длительность действия нагрузки; неупругие деформации бетона; возникновение и развитие трещин в растянутых зонах бетона; усилия предварительного натяжения арматуры; влажностные условия эксплуатации железобетонных конструкций; сцепление арматуры с бетоном. Определена связь «момент-кривизна» для предварительно напряженного изгибаемого элемента, которая представлена тремя участками.*

**Ключевые слова:** высота сжатой зоны бетона, гипотеза плоских сечений, кривизна, нелинейная деформационная модель, относительные деформации бетона и арматуры, прогиб, сверхпроектные нагрузки

### 1. Введение

Согласно техническим нормам прогибы железобетонных конструкций определяются при воздействии нормативной (эксплуатационной) нагрузки. В тоже время в эксплуатируемых зданиях и сооружениях вследствие различных причин, связанных с уровнем проектирования, качеством изготовления, строительно-монтажных работ и условиями эксплуатации, возможны случаи превышения своих нормативных значений, а дальнейшее их развитие может привести к наступлению предаварийного состояния и разрушению строительного объекта или его части [1-5, 8, 9]. Расчет прогибов при воздействии разрушающих нагрузок и их сравнение с фактическими прогибами при эксплуатации, позволяет дать оценку близости фактического напряженного состояния конструкции к аварийному [6, 7, 10, 11].

### 2. Расчётная модель

Прогиб зависит от кривизны, и для изгибаемых элементов он равен:

$$f = \int_0^l M_x \left( \frac{1}{r} \right) dx \quad (1)$$

$\left( \frac{1}{r} \right)$  - полная кривизна элемента в сечении  $x$  от внешних нагрузок

$M_x$  - изгибающий момент в сечении  $x$  от действия единичной силы, приложенной в сечении, для которого определяется прогиб, в направлении этого прогиба

Кривизна изгибаемого элемента в каждом сечении представляет собой тангенс угла наклона относительных деформаций бетона и арматуры:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_b}{x_1} = \frac{\varepsilon_s}{h_0 - x_1} = \frac{\varepsilon_b + \varepsilon_s}{h_0} \quad (2)$$

$\varepsilon_b, \varepsilon_s$  - относительная деформация соответственно сжатого бетона и растянутой арматуры

$x_1$  - высота сжатой зоны бетона

$h_0$  - рабочая высота сечения

При определении кривизны  $\frac{1}{\rho}$  учитываются особенности поведения бетона как

упруго-пластического материала при воздействии нагрузок. К этим особенностям относятся:

- длительность действия нагрузки;
- неупругие деформации бетона;
- возникновение и развитие трещин в растянутых зонах бетона;
- усилия предварительного натяжения арматуры;
- влажностные условия эксплуатации железобетонных конструкций;
- сцепление арматуры с бетоном.

Высота сжатой зоны бетона  $x_1$  и максимальные относительные деформации сжатого бетона  $\varepsilon_b$  в сечении с трещиной определяются решением системы уравнений (3) (4) с применением гипотезы плоских сечений:

$$\sum X = 0, \quad \sum \sigma_{bi} A_{bi} - \sum \sigma_{sj} A_{sj} = 0, \quad (3)$$

$$\sum M = 0, \quad \sum \sigma_{bi} A_{bi} Z_{bi} - \sum \sigma_{sj} A_{sj} Z_{sj} = M, \quad (4)$$

где  $A_{bi}$  - площадь участка сжатого бетона малой высоты, напряжения в котором принимают равномерно распределенными и соответствующими деформациям на уровне середины высоты участка.

$A_{sj}$  - площадь j-ого стержня арматуры.

$\sigma_{bi}, Z_{bi}$  - расстояние от центра тяжести j-ого участка бетона до нейтральной оси и напряжения в бетоне на уровне его центра тяжести.

$\sigma_{sj}, Z_{sj}$  - расстояние от центра тяжести j-ого арматурного стержня до нейтральной оси и напряжения в нем

$M$  - изгибающий момент от нагрузки.

Уравнения (3) (4), распределяющие напряженное состояние железобетонной конструкции в сечении с трещиной решаются методом итераций. Задаются значением высоты сжатой зоны  $x_{1k}$  и максимальной относительной деформацией бетона в сочетании с трещиной  $\varepsilon_{bk}$  и на основе гипотезы плоских сечений определяют относительные деформации бетона и арматуры по высоте конструкции.

$$\varepsilon_{bi} = \frac{\varepsilon_{bk}}{x_{1k}} x_{bi}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{sj} = \frac{\varepsilon_{bk}}{x_{1k}} x_{sj}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{bi}, \varepsilon_{sj}$  - текущие значения, относительных деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры по высоте сечения.

$x_{bi}, x_{sj}$  - расстояние от центра тяжести i-ого участка бетона и j-ого стержня арматуры.

$k=1, 2, \dots$  n- номер итерации

Напряжения  $\sigma_{bik}, \sigma_{sjk}$  устанавливаются в зависимости от соответствующих относительных деформаций по диаграмме  $\sigma_b - \varepsilon_b$  и  $\sigma_s - \varepsilon_s$ .

Значения напряжений  $\sigma_{bik}, \sigma_{sjk}$  подставляются в формулы (3), (4) и проверяются условия равновесия в сечении с трещиной. Если условия равновесия не соблюдаются, то выполняется следующая итерация и так до тех пор, пока достигнут условия  $\Sigma X = 0, \Sigma M = 0$  с необходимой точностью.

Значения относительных деформаций бетона  $\varepsilon_b$  и высоты сжатой зоны  $x_1$ , для определения кривизны  $\frac{1}{\rho}$  в поперечном сечении бетонного блока между трещинами определяются в результате решения системы уравнений (3), (4) с введением условия, что значения относительных деформаций растянутого бетона не превышают предельных значений.

Значения  $x_1$  и  $\varepsilon_b$  можно также определить по методике, изложенной в [10].

### 3. Результаты и обсуждение

Зависимость «изгибающий момент-кривизна» для предварительно напряженной балки состоит из трех участков (рис.1)

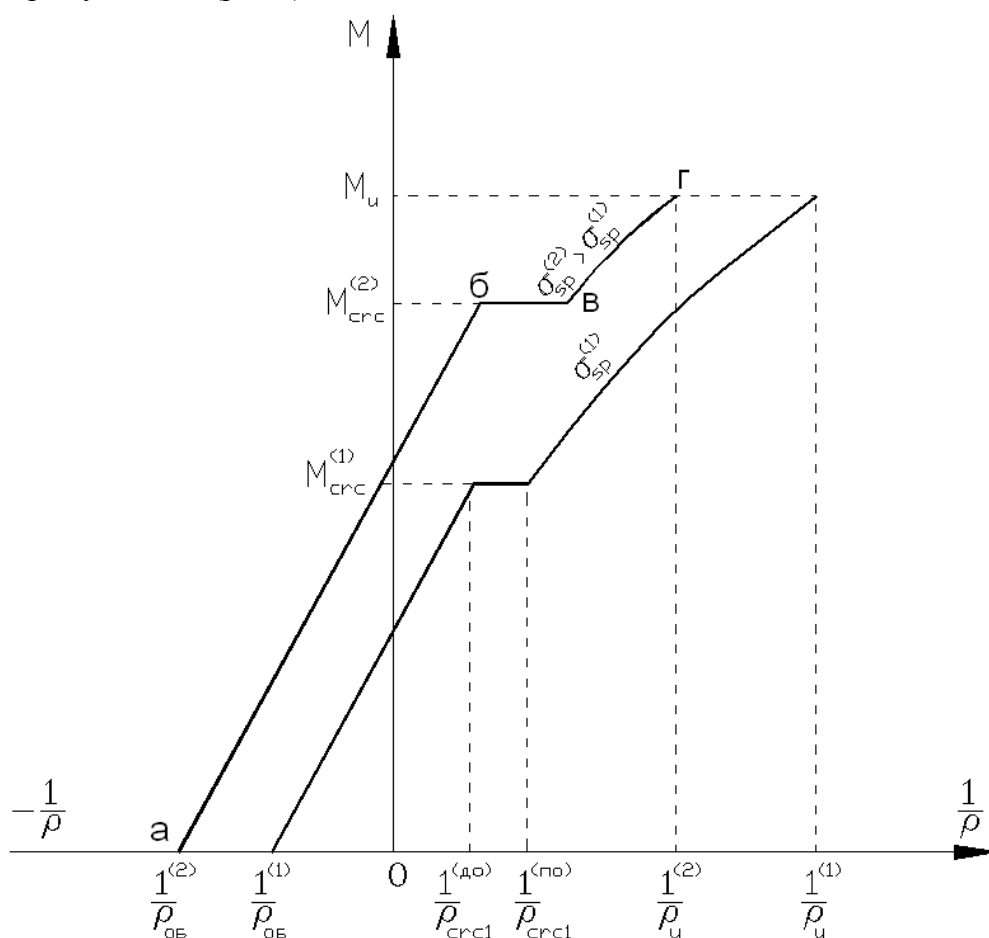


Рисунок 1 - Зависимость «момент-кривизна» в предварительно напряженном изгибаемом элементе

$M_{crc}^{(1)}, M_{crc}^{(2)}$  – моменты образования трещин при предварительных напряжениях в арматуре  $\sigma_{sp}^{(1)}$  и  $\sigma_{sp}^{(2)} > \sigma_{sp}^{(1)}$ ;  
 $\frac{1}{\rho_{об}^{(1)}}, \frac{1}{\rho_{об}^{(2)}}$  кривизна после обжатия изгибаемого элемента;



$\frac{1^{(ДО)}}{\rho_{crc1}}, \frac{1^{(ПО)}}{\rho_{crc1}}$  - кривизны при  $M_{crc}$  до образования и после образования трещины;

$\frac{1^{(1)}}{\rho_u}, \frac{1^{(2)}}{\rho_u}$  - кривизна в предельном состоянии.

участок а-б – линейная зависимость между  $M$  и  $\frac{1}{\rho}$ ,

участок б-в – увеличение кривизны при постоянном значении изгибающего момента, равного моменту образования трещины  $M_{crc}$

участок в-г – кривая второго порядка (парабола) зависимости изгибающего момента от кривизны.

На участке а-б изгибаемая балка деформируется с полным сечением практически как упругая конструкция с небольшими пластическими деформациями.

На участке б-в при изгибающем моменте, равном моменту образования трещин наблюдается мгновенное увеличение кривизны в виде скачка после образования трещины вследствие снижения жесткости конструкции с дальнейшим увеличением нагрузки. На участке в-г балка работает с нарушением сплошной вследствие образования и развития вертикальных трещин; высота сжатой зоны бетона уменьшается, сжимающие напряжения растут. При этом продольным деформациям сжатия сопутствуют поперечные деформации растяжения, что приводит к образованию продольных микротрещин в сжатой зоне изгибаемой балки. С увеличением нагрузки микротрещины развиваются и переходят в макротрещины, которые расчленяют сжатую зону бетона на отдельные столбики, образующие область выкалывания. В результате сжатая зона в предельном состоянии не представляет собой монолитный бетон, а является областью с нарушенной сплошностью, ослабленной продольными трещинами отрыва как по высоте, так и по ширине сжатой зоны. В области выкалывания бетона, образованной продольными трещинами отрыва при достижении в бетоне предельных относительных деформаций сжатия несущая способность бетона исчерпывается и происходит разрушение конструкции.

На третьем участке в-г зависимость  $\frac{1}{\rho} = f(M)$ ,  $M \geq M_1$  предлагается [6, 10] параболическая зависимость между двумя её граничными значениями: в момент образования трещин, в момент разрушения. После преобразования зависимость  $M = f(\rho)$  выглядит так:

$$M = M_u - \left( \frac{\frac{1}{\rho_u} - \frac{1}{\rho}}{\frac{1}{\rho_u} - \frac{1}{\rho_{crc}}} \right)^2 (M_u - M_{crc}), \quad (7)$$

$M_u, \rho_u$  - разрушающий момент, определяемый при нормативных сопротивлениях материалов, и кривизна конструкции в момент разрушения

$M_{crc}, \frac{1}{\rho_{crc}}$  - момент трещинообразования и кривизна после образования трещин

Кривизна  $\frac{1}{\rho_u}$  и высота сжатой зоны  $x_1$  определяются на основе решений уравнений (3)

(4) при  $M = M_u$

Изменение кривизны железобетонной конструкции в пределах расстояния между трещинами зависят от сил сцепления между арматурой и бетоном и может быть принята синусоидального типа. Функция изменения кривизны в зоне без трещин описывается линейной зависимостью.

По изложенной методике определяются кривизны железобетонных элементов согласно (2) и прогибы согласно (1).

Для элементов постоянного сечения, работающих как свободно опертые или консольные балки, допускается определять прогиб по кривизне наиболее опасного сечения, в котором действует  $M = M_{max}$ :

$$f = \left( \frac{1}{r} \right)_{\max} s l^2, \quad (8)$$

где  $\left( \frac{1}{r} \right)_{\max}$  - полная кривизна в сечении с наибольшим изгибающим моментом  $M = M_{max}$

$$\left( \frac{1}{r} \right)_{\max} = \frac{\varepsilon_b}{x_{1\max}} = \frac{\varepsilon_s}{h_0 - x_{1\max}} = \frac{\varepsilon_b + \varepsilon_s}{h_0}$$

$x_{1\max}$  - высота сжатой зоны при действии  $M = M_{max}$ .

$s$  - коэффициент, зависящий от схемы нагружения:  $s=5/48$  для свободно опертой балки, загруженной равномерно распределенной нагрузкой.

Предельное значение прогиба при  $M = M_u$  равно:

$$f_{ult} = \frac{1}{\rho_u} s l^2 \quad (9)$$

Кривизна в предельном состоянии  $\frac{1}{\rho_u}$  равна:

$$\frac{1}{\rho_u} = \frac{\varepsilon_{b,ult}}{x_{ult}} = \frac{\varepsilon_{s,ult}}{h_0 - x_{ult}} = \frac{\varepsilon_{b,ult} + \varepsilon_{s,ult}}{h_0} \quad (10)$$

$\varepsilon_{s,ult}$ ,  $\varepsilon_{b,ult}$  – предельные относительные деформации сжатия бетона и удлинения арматуры.

$x_{ult}$  - высота сжатой зоны в предельном состоянии.

В предельном состоянии должно соблюдаться условие

$$f \leq f_{ult} \quad \text{или} \quad \left( \frac{1}{r} \right)_{\max} \leq \frac{1}{\rho_u} \quad (11)$$

### Заключение

Предлагается методика расчета прогибов железобетонных конструкций при нагрузках, превышающих нормативные значения и позволяющая оценить напряженно-деформированное состояние конструкции и его близость к возможному моменту разрушения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баширов Х. З. К определению параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных составных конструкций в зоне нормальных трещин / Х. З. Баширов // Academia. Архитектура и строительство. – 2013. – № 10. – С. 25–32.
2. Баширов Х. З. К расчету прогибов обычных и составных внецентренно сжатых железобетонных конструкций / Х. З. Баширов, И. А. Яковенко, И. С. Горностаев [и др.] // Железобетонные конструкции: исследования, проектирование, методика преподавания : сб. докл. межд. науч.-метод. конф., посвященной 100-летию со дня рождения В. Н. Байкова, 4–5 апреля 2012г. – М. : МГСУ, 2012. – С. 46–55.
3. Карпенко С.Н. Об одном методе построения диаграмм деформирования арматуры в элементах с трещинами с использованием секущих и касательных модулей / С. Н. Карпенко // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 566–569.

4. Кодыш Э. Н. Расчет железобетонных конструкций из тяжелого бетона по прочности, трещиностойкости и деформациям : монография / Э. Н. Кодыш, И. К. Никитин, Н. Н. Трекин. – М.: Изд. АСВ, 2010. – с. 352.
5. Колчунов В. И. Об использовании гипотезы плоских сечений в железобетоне / В. И. Колчунов, И. А. Яковенко // Строительство и реконструкция. – 2011. – №6(38). – С. 16–23.
6. Колчунов В.И. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях монография / В.И. Колчунов, Н.В. Ключева, Н.Б. Андросова, А.С. Бухтиярова. – М., 2014.
7. Ключева Н.В. Прочность и деформативность сборно-монолитных каркасов жилых зданий пониженной материалоемкости при запроектных воздействиях / Н.В. Ключева, В.И. Колчунов, Д.А. Рыпаков, А.С. Бухтиярова // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 1. С. 5-9.
8. Король Е. А. Деформационная модель для расчета трехслойных железобетонных элементов / Е. А. Король // Изв. вузов. Строительство. – Новосибирск, 2004. – №5. –С. 11–17.
9. Меркулов Д. С. Выбор расчетной модели составных железо–бетонных конструкций при сложном напряженном состоянии / Д. С. Меркулов // Строительство – 2009: материалы юбилейной международной научно–практической конференции. – Ростов–на–Дону, 2009. – С. 59–61.
10. Федоров В.С. Расчет расстояния между пространственными трещинами и ширины их раскрытия в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом (случай 2) / В.С. Федоров, Вл.И. Колчунов, А.А. Покусаев // Жилищное строительство. - 2016. - № 5. - С. 16-21.
11. Травуш В.И. Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений / В.И. Травуш, В.И. Колчунов, Н.В. Ключева // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 3. – С. 4-11.

**Федоров Виктор Сергеевич**

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва

Академик РААСН, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения»

E-mail: [fvs\\_skzs@mail.ru](mailto:fvs_skzs@mail.ru)

**Шавыкина Марина Витальевна**

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»

E-mail: [shavikina\\_e@mail.ru](mailto:shavikina_e@mail.ru)

**Юсупова Екатерина Владимировна**

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва

Кандидат технических наук, ассистент кафедры «Проектирование и строительство железных дорог»

E-mail: [shavikina\\_e@mail.ru](mailto:shavikina_e@mail.ru)

---

V.S. FEDOROV, M.V. SHAVYKINA, E.V. YUSUPOVA

## DEFINITION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN LIMIT STATE

*The article presents the calculation procedure of deflections of reinforced concrete structures under loads exceeding the standard values, which allows to estimate the stress-strain state of the structure and its proximity to a possible destruction point. As a basis for the calculation of the curvatures, which determine the deflection of reinforced concrete structures, was taken the non-linear deformation model recommended by the set of rules SP 63.13330.2012 «Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions».*

**Keywords:** height of the compressive zone of concrete, plane sections hypothesis, curvature, non-linear deformation model, relative deformations of concrete and reinforcement, deflection, beyond the design load

## BIBLIOGRAPHY

1. Bashirov KH. Z. K opredeleniyu parametrov napryazhenno-deformirovanogo sostoyaniya zhelezobeton-nykh sostavnykh konstruktsiy v zone normal'nykh treshchin / KH. Z. Bashirov // Academia. Arkhitektura i stroitel'-stvo. – 2013. – № 10. – С. 25–32.

2. Bashirov K.H. Z. K raschetu progibov obychnykh i sostavnykh vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh konstruktсий / K.H. Z. Bashirov, I. A. Yakovenko, I. S. Gornostayev [i dr.] // Zhelezobetonnyye konstruktсии: issledovaniya, proyektirovaniye, metodika prepodavaniya : sb. dokl. mezhd. nauch.-metod. konf., posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya V. N. Baykova, 4–5 aprelya 2012g. – M. : MGSU, 2012. – S. 46–55.
3. Karpenko S.N. Ob odnom metode postroyeniya diagramm deformirovaniya armatury v elementakh s treshchinami s ispol'zovaniyem sekushchikh i kasatel'nykh moduley / S. N. Karpenko // Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. – 2010. – № 3. – S. 566–569.
4. Kodysh E. N. Raschet zhelezobetonnykh konstruktсий iz tyazhelogo betona po prochnosti, treshchino-stoykosti i deformatsiyam : monografiya / E. N. Kodysh, I. K. Nikitin, N. N. Trekin. – M.: Izd. ASV, 2010. – s. 352.
5. Kolchunov V. I. Ob ispol'zovanii gipotezy ploskikh secheniy v zhelezobetone / V. I. Kolchunov, I. A. Yakovenko // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2011. – №6(38). – S. 16–23.
6. Kolchunov V.I. Zhivuchest' zdaniy i sooruzheniy pri zaproyektnykh vozdeystviyakh monografiya / V.I. Kolchunov, N.V. Klyuyeva, N.B. Androsova, A.S. Bukhtiyarova. – M., 2014.
7. Klyuyeva N.V. Prochnost' i deformativnost' sborno-monolitnykh karkasov zhilykh zdaniy poni-zhennoy materialoymkosti pri zaproyektnykh vozdeystviyakh / N.V. Klyuyeva, V.I. Kolchunov, D.A. Rypakov, A.S. Bukhtiyarova // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2015. № 1. S. 5-9.
8. Korol' Ye. A. Deformatsionnaya model' dlya rascheta trekhsloynykh zhelezobetonnykh elementov / Ye. A. Korol' // Izv. vuzov. Stroitel'stvo. – Novosibirsk, 2004. – №5. –S. 11–17.
9. Merkulov D. S. Vybor raschetnoy modeli sostavnykh zhelezo–betonnykh konstruktсий pri slozhnom napryazhennom sostoyanii / D. S. Merkulov // Stroitel'stvo – 2009: materialy yubileynoy mezhdunarodnoy nauchno–prakticheskoy konferentsii. – Rostov–na–Donu, 2009. – S. 59–61.
10. Fedorov V.S. Raschet rasstoyaniya mezhdru prostranstvennymi treshchinami i shiriny ikh raskrytiya v zhelezobetonnykh konstruktсиyakh pri kruchenii s izgibom (sluchay 2) / V.S. Fedorov, V.I. Kolchunov, A.A. Poku-sayev // Zhilishchnoye stroitel'stvo. - 2016. - № 5. - S. 16-21.
11. Travush V.I. Nekotoryye napravleniya razvitiya teorii zhivuchesti konstruktivnykh sistem zdaniy i sooruzheniy / V.I. Travush, V.I. Kolchunov, N.V. Klyuyeva // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. – 2015. – № 3. – S. 4-11.

**V.S. Fedorov**

Russian University of Transport (MIIT), Moscow  
Academian of RAACS, Doctor of Technical Science, Prof.,  
Head of the Building Constructions, Buildings and Structures Department  
E-mail: [fvs\\_skzs@mail.ru](mailto:fvs_skzs@mail.ru)

**M.V. Shavykina**

Russian University of Transport (MIIT), Moscow  
Candidate of Technical Science, Associated Prof. of the Building Constructions, Buildings and Structures Department  
E-mail: [shavikina\\_e@mail.ru](mailto:shavikina_e@mail.ru)

**E.V. Yusupova**

Russian University of Transport (MIIT), Moscow  
Candidate of Technical Science, Assistant of the Design and Construction of Railways Department  
E-mail: [shavikina\\_e@mail.ru](mailto:shavikina_e@mail.ru)

**БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

УДК 624.07

ВАНУС Д.С.

**ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ УЧЕТЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ АРМАТУРЫ КАК ВАНТОВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ ОСОБЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

*Предложен метод оценки балочных конструкций при учете работы в упругой, пластической и в стадии деформирования арматуры как вантовой системы. Условия прочности характеризуется предельной деформацией арматуры. Рассмотрены балочные конструкции с арматурой с физическим пределом текучести. Для динамического расчета железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки использованы методы, в которых приведены зависимости для определения параметров динамических нагрузок, возникающих при взрывах различных веществ. Предельные моменты определяются при динамических сопротивлениях арматуры и бетона. После разрушения бетона сжатой зоны во всей арматуре (нижней и верхней) возникает продольная растягивающая сила и расчетной схемой балки становится вантовая система, если обеспечена прочность стыковых соединений и анкеровки стержней арматуры.*

**Ключевые слова:** балочные конструкции, динамический расчет, деформирование арматуры как вантовой системы.

**1. Общее положение**

Безопасность конструкций при действии особых динамических нагрузок, возникающих при техногенных воздействиях (взрывы, удары и т.п.), обеспечивается требованием отсутствия обрушения согласно аварийному предельному состоянию. В этом случае в конструкциях с большим запасом пластических деформаций последовательно возникают следующие стадии деформирования: условно упругая (при деформировании арматуры в упругой стадии с возможными трещинами); пластическая стадия (при деформировании арматуры в пластической стадии в пластических шарнирах и при сохранении прочности бетона в сжатых зонах; после разрушения сжатого бетона деформирование арматуры как вантовой системы [1-4].

Рассмотрены балочные конструкции с арматурой с физическим пределом текучести.

Нагрузка представлена: статической  $q_{st}$  и динамической конечной длительности  $p(t)=pf(t)$ ,  $1 \leq f(t)$ ,  $f(0)=0$ , постоянной во времени интенсивностью  $p(f)=1$ ; мгновенным импульсом интенсивностью  $i$  ( $f(t)=0$ ,  $p=\infty$ ).

Для динамического расчета железобетонных конструкций на взрывание и ударные нагрузки использованы методы, изложенные в работах [5-14]. В этих работах приведены зависимости для определения параметров динамических нагрузкой, возникающих при взрывах различных веществ.

**2. Расчет балки на действие постоянной во времени динамической нагрузки  $p$  ( $f(t)=1$ )****2.1. Расчет балки в упругой стадии**

Рассмотрена однопролетная балка постоянного поперечного сечения.

Для динамического и статического прогибов приняты выражения:

$$y_1(x, t) = pF(x)T_1(t), y_{st}(x) = q_{st} F(x), \quad (1)$$

где  $F(x)$  – прогиб балки от единичной нагрузки ( $BF_x^N = 1$ );

$B$  – изгибная жесткость.

$$T_1(t) = 1 - \cos \omega t, \dot{T}_1(t) = \omega \sin \omega t, \quad (2)$$

где  $\omega = \frac{\lambda^2}{l^2} \sqrt{\frac{B}{m}}$  – круговая частота колебаний балки.

$$\omega^2 = \frac{\int F(x) dx}{m \int F^2 dx}. \quad (3)$$

Значения  $\lambda^2 = \pi^2; 22,4; 15,4$  – при закреплении концов балки соответственно шарнирно, жестко, податливо.

Конец упругой стадии характеризуется достижением предельного прогиба  $Y_{bl} = q_{ud} F\left(\frac{l}{2}\right)$ , где  $q_{ud}$  – предельная нагрузка, определенная методом предельного равновесия и равная при близких предельных моментах:

$$q_{ud} = \frac{8}{l^2} \left( M_{ud}^{(snp)} + M_{ud}^{(sn)} \right). \quad (4)$$

Предельные моменты определяются при динамических сопротивлениях арматуры и бетона.

В момент времени  $t_1$  конца упругой стадии:

$$T_1(t_1) = \gamma_p, \gamma_p = \frac{q_{ud} - q_{st}}{p}, \cos \omega t_1 = 1 - \gamma_p, \quad (5)$$

где  $\gamma_p = \frac{q_{ud} - q_{st}}{p}$  – коэффициент динамичности по нагрузке.

Скорость балки в конце упругой стадии равна:

$$\dot{y}_1(x_1 t_1) = p F(x) \dot{T}_1(t_1) = p F(x) \omega \sin \omega t_1 = p F(x) \omega \sqrt{\gamma_p (2 - \gamma_p)}. \quad (6)$$

## 2.2. Расчет балки в пластической стадии

Расчетная схема балки представлена в виде механизма из двух жестких половин в общем случае с тремя пластическими шарнирами.

Перемещение балки в пластической стадии принимается равным:

$$y_2(x, t) = \varphi(t) x; \quad 0 \leq x \leq \frac{l}{2}, \quad t \geq t_1, \quad (7)$$

где  $\varphi(t)$  – угол поворота половины балки, уравнение для которого получают на основе принципа возможных перемещений.

Начальную угловую скорость  $\dot{\varphi}(t_1) = \dot{\varphi}_0$  находят из равенства количества движения балки в конце упругой и в начале пластической стадии:

$$\begin{aligned} \int_0^l m \dot{y}_1(x_1 t_1) dx &= m p \int_0^l F(x) dx; \quad \dot{T}_1(t_1) = 2m \int_0^{\frac{l}{2}} \dot{\varphi}_0 x dx = m \frac{l^2}{4} \dot{\varphi}_0; \\ \dot{\varphi}_0 &= \frac{p l^3}{c_0 B} \dot{T}_1(t_1); \quad \int_0^l F(x) dx = \frac{l^5}{4 c_0 B_0}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $c_0 = 30, 80, 180$  – при шарнирах, податливых и жестких очках.



Конец пластической стадии балки характеризуется предельным углом раскрытия в пластическом шарнире, соответствующим началу разрушения бетона, равным:

$$\psi_u = \frac{0,004}{\xi}, \quad \xi = \frac{R_{sd}}{R_{ld}}, \quad (9)$$

полученный на основе работы [12].

Уравнение движения балки в пластической стадии имеет вид:

$$\ddot{\phi} = A_1, \quad A_1 = \frac{3P}{ml}(1 - \gamma_p). \quad (10)$$

При  $\gamma_p < 1$  (нагрузка  $p$  большой интенсивности)  $\ddot{\phi} > 0$  и происходит неограниченный рост  $\phi$ , прогибов углов раскрытия  $\psi(t)$  в пластических шарнирах. В некоторый момент времени  $\bar{t}_2 = t_2 - t_1$  при  $\psi_{\max}(\bar{t}_2) = \psi_u$  происходит разрушение бетона сжатой зоны и возникает стадия деформирования арматуры как винтовой системы.

При  $\gamma_p > 1$   $\ddot{\phi} = -A_1$ ,  $A_1 = \frac{3p}{ml}(y_p - 1)$ , тогда  $\dot{\phi} = -A_1 \bar{t} + \dot{\phi}_c$ ,

$$\phi = -\frac{A_1 \bar{t}_2^2}{2} + \dot{\phi}_0 \bar{t}; \quad \text{при } \bar{t}_2 = \frac{\dot{\phi}_0}{A_1} \quad \phi_0(t_2) = 0 \text{ и } \phi_{\max} = \phi(\bar{t}_2) = \frac{\dot{\phi}_0^2}{2A_1}.$$

Для пролетного сечения  $\psi_{\max} = 2\phi_{\max}$  и при  $\psi_{\max} < \psi_u$  прочность балки обеспечена; если  $\psi_{\max} > \psi_u$ , то балка разрушается и возникает стадия деформирования арматуры как вантавой системы.

Рассмотрим процесс деформирования при  $\gamma_p < 1$ , когда справедливо уравнение (10). Тогда

$$\dot{\phi} = A_1 \bar{t} + \dot{\phi}_0, \quad \phi = \frac{A_1 \bar{t}^2}{2} + \dot{\phi}_0 \bar{t}, \quad (11)$$

где  $\phi_0$  находится по формуле (8).

Разрушение балки произойдет в момент времени  $\bar{t}_2$ , когда

$$\psi^{(sn)}(t_2) = 2\phi = A_1 t_2^2 + 2\dot{\phi}_0 \bar{t}_2 = \psi_u, \quad (12)$$

$$\text{т.е.} \quad \bar{t}_2 = -\frac{\dot{\phi}_0}{A_1} + \sqrt{\frac{\dot{\phi}_0^2}{A_1^2} + \frac{\psi_u}{A_1}}. \quad (13)$$

Согласно зависимостям (8), (10) выражение (13) приводится к виду:

$$t_2 = \omega(t_2) = -S + \sqrt{S^2 + D}, \quad (14)$$

$$\text{где} \quad S = r \frac{\sqrt{\gamma_p(2 - \gamma_p)}}{1 - \gamma_p}, \quad r = \frac{\lambda^4}{3C_0}; \quad (15)$$

$$\square = \frac{\psi_u \omega^2}{A_1}. \quad (16)$$

Формула (16) преобразуется к виду:

$$D = \psi_u \frac{\lambda^4 B}{3pl^3(1 - \gamma_p)}. \quad (17)$$

Максимальный прогиб балки в конце пластической стадии:

$$Y_2\left(\frac{l}{2}\right), \bar{t}_2 = \varphi(t_2) \frac{l}{2}.$$

Скорость балки в конце пластической стадии будет равна:

$$\dot{y}_2(x, \bar{t}_2) - \dot{\varphi}(\bar{t}_2)x, \quad \dot{\varphi}(\bar{t}_2) = A_1 \bar{t}_2 + \ddot{\varphi}_2 A_1. \quad (18)$$

### 2.3. Расчет арматуры как вантовой системы

После разрушения бетона сжатой зоны согласно условию (12) во всей арматуре (нижней и верхней) возникает продольная растягивающая сила  $H = R_{sd} A_s$  и расчетной схемой балки становится вантовая система, если обеспечена прочность стыковых соединений и анкеровки стержней арматуры. Перемещение ванта обозначено  $W(x, t)$ .

Уравнение движения ванта с постоянной продольной растягивающей силой  $H$  имеет вид[5]:

$$-H \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = P^* = p + q_{st}. \quad (19)$$

Для перемещения ванта принята зависимость:

$$W(x, t) = Z(t) \sin \frac{\pi x}{l}. \quad (20)$$

После подстановки (20) в (19) и применения метода Бубнова-Галёркина следует уравнение:

$$\ddot{Z} + \omega_s^2 Z = \frac{4p^*}{\pi m}, \quad \omega_s^2 = \frac{\pi^2}{l^2} \frac{H}{m}. \quad (21)$$

Решение уравнения (21) с учетом начальных условий  $Z(0) = 0, Z'(0) = Z'_0$  [11]:

$$Z(t) = \frac{z_0}{\omega_s} \sin \omega_s t + \frac{4p^* l^2}{\pi^3 H} (1 - \cos \omega_s t). \quad (22)$$

$$\dot{Z}(t) = \dot{Z}_0 \cos \omega_s t + \frac{4p^* l^2}{\pi^3 H} \sin \omega_s t. \quad (23)$$

Начальную скорость  $\dot{Z}_0$  определяют из условия равенства количеств движения балки в момент ее разрушения и вантовой системы в момент ее образования. Согласно (18) будет:

$$\int_0^{l/2} (A_1 \bar{t}_2 + \dot{\varphi}_0) x dx = \dot{Z}(0) \int_0^1 \sin \frac{\pi}{l} x dx.$$

Отсюда

$$\dot{Z}_0 = \frac{\pi l}{8} (A_1 \bar{t}_2 + \dot{\varphi}_0).$$

Выражение (23) представлено в виде:

$$\dot{z}(t) = (A \cos w_s t + B \sin w_s t) w_s, \quad A = \frac{\dot{z}_0}{w_s}, \quad B = \frac{4pl^2}{\pi^3 H}.$$

Время достижения максимального провиса находится из выражения:

$$\dot{z}_{(t_m)} = 0, \quad A \cos w_s t_m + B \sin w_s t_m = 0, \text{ т.е. } \operatorname{tg} w_s t_m = -\frac{A}{B}.$$

$$\text{При этом } \sin w_s t_m = -\frac{\operatorname{tg} w_s t_m}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 w_s t_m}} = \frac{A}{\sqrt{B^2 + A^2}}, \quad \cos w_s t_m = -\frac{B}{\sqrt{B^2 + A^2}}.$$

Максимальный провис будет равен:

$$z_{\max} = z(t_m) = \frac{A^2}{\sqrt{A^2 + B^2}} + \frac{B^2}{\sqrt{A^2 + B^2}} + B = B + \sqrt{A^2 + B^2}. \quad (24)$$

Полный прогиб балки определяется по формулам:

$$f_b = f + z_{\max}, f = f_{el} + f_{rl},$$

где  $f_{el} = q_{nd} F(\frac{l}{2})$ ;  $f_{rl} = \varphi(\bar{t}_2) \frac{l}{2}$ .

Для обеспечения аварийного предельного состояния требуется выполнение условий:

- по предельной деформации арматуры

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\pi^2}{4l^2} (2fz_{\max} + z_{\max}^2) \leq \varepsilon_n = 0,6\varepsilon_{sn}, \quad (25)$$

где  $\varepsilon_{sn}$  - предельная относительная деформация арматуры при разрыве;

- по допустимому прогибу балки:

$$f_b \leq f_{don},$$

где  $f_{don}$  зависит от высоты внутренних конструкций, оборудования и т.п.

Расчеты показывают, что влияние скорости  $\dot{z}_0$  незначительно и можно принять  $\dot{z}_0 = 0$ , тогда

$$z_{\max} = 2B = \frac{8p^* l^2}{\pi^3 H}. \quad (26)$$

Условие (25) представляется в виде:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\pi^2}{4l^2} z_{\max}^2 \leq \varepsilon_n. \quad (26)$$

Из этих выражений можно получить значение предельной динамической нагрузки (без промежуточных вычислений):

$$P = \frac{\pi^2 H}{4l} \sqrt{\varepsilon_n} - q_{st}. \quad (27)$$

Если обеспечена прочность стыковых соединений и анкеровки стержней арматуры, то в верхней и нижней арматуре балочных конструкций возникает продольная растягивающая сила и расчетной схемой балки становится вантовая система

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия: справочник проектировщика [Текст] / М. Ф. Барштейн, Н. М. Бородачев, Л. Х. Блюмин [и др.]; под ред. Б. Г. Коренева, Н. М. Рабиновича. – М.: Стройиздат, 1981. – 215 с.
2. Алмазов, В.О. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению [Текст] / В.О. Алмазов, А.И. Плотников, Б.С. Расторгуев // Вестник МГСУ. – 2011. – № 2–1. – С. 16–20.
3. Расторгуев, Б.С. Методы расчета зданий на устойчивость против прогрессирующего разрушения [Текст] / Б.С. Расторгуев // Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2009. – № 13. – С. 15–20.
4. Расторгуев, Б.С. Обеспечение живучести зданий при особых динамических воздействиях [Текст] / Б.С. Расторгуев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2003. – №4. – С. 45–48.
5. Попов, Н.Н. Расчет конструкций на динамические и специальные нагрузки [Текст] / Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев, А.В. Забегаев. – М.: Высшая школа, 1992. – 319 с.
6. Тамразян, А.Г. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку [Текст] / А.Г. Тамразян, Л.А. Аветисян // Строительство: наука и образование. – 2013. – № 4. – С. 2.

7. Парфенов, С.Г. Методика численного расчета стержневых систем на сейсмические воздействия с учетом податливости основания [Текст] / С.Г. Парфенов, А.Г. Тамразян, П.А. Буро, И.В. Черный // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. - 2007. - № 4-16. - С.55-57.
8. Тамразян, А.Г. Динамическая устойчивость сжатого железобетонного элемента как вязкоупругого стержня [Текст] / А.Г. Тамразян // Вестник МГСУ. - 2011. - № 1-2. - С.193-196.
9. Тамразян, А.Г. Экспериментальные исследования внецентренно сжатых железобетонных элементов при кратковременных динамических нагружениях в условиях огневых воздействий [Текст] / А.Г. Тамразян, Л.А. Аветисян // Промышленное и гражданское строительство. - 2014. - № 4. - С. 24-28.
10. Расторгуев, Б.С. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий [Текст] / Б.С. Расторгуев // Динамика железобетонных плит при взрывных нагрузках. / под. ред. В.А. Котляревского[и др.]. - Том 6. - М.: Издательство АСВ, 2003. - С. 343-365.
11. Тамразян, А.Г. Надежность и защита московских массовых серий от прогрессирующего обрушения при ЧС природного и техногенного характера [Текст] / А.Г. Тамразян // Безопасность жизнедеятельности : Науч.-практ. и учеб.метод. журн. - 2002. - N1. - С. 35 -38.
12. Жарницкий, В.И. Развитие теории расчета упругопластических железобетонных конструкций на основе динамические воздействия [Текст]: Дисс. докт. техн. наук 05.23.01 / В.И. Жарницкий- М: МИСИ, -1988.
13. Хуршудян, Ас. Ж. Метод Бубнова-Галеркина в задачах управления билинейными системами [Текст] / Ас. Ж. Хуршудян // Автомат. и телемех. - 2015. - № 8. - С. 46-55
14. Расторгуев, Б.С. Оценка безопасности железобетонных конструкций при чрезвычайных ситуациях техногенного характера [Текст] / Б.С. Расторгуев, Д.С. Ванус // Строительство и реконструкция. - 2014. - №6 (56).

**Ванус Дахи Сулеман**

ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», г. Москва

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции»

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

---

D.S. VANUS

## STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AT THE ACCOUNT OF THE DEFORMATION OF THE REINFORCEMENT AS A VANTE SYSTEM IN ACTION OF SPECIAL DYNAMIC LOADS

*Offered by method for estimating beam structures at work registered in the elastic, plastic and reinforcement stage of deformation as a cable system. Terms strength is characterized by limiting valve deformation. Considered beam structures with fittings to the physical limit of fluidity. For dynamic analysis of reinforced concrete structures on the blast and shock methods used, which shows the dependence for determining the parameters of the dynamic loads produced by explosions of various substances. Limit points are determined by the dynamic resistance of reinforcement and concrete. After the destruction of the concrete compression zone in the entire reinforcement(bottom and top) there is a longitudinal tensile strength and design scheme of the beam becomes a cable system, if provided by the strength of joints and anchoring of reinforcement bars.*

**Keywords:** beam structures, dynamic analysis, and deformation of the valve as a cable system.

## BIBLIOGRAPHY

1. Dinamicheskiy raschet sooruzheniy na spetsial'nyye vozddeystviya: spravochnik proyektirovshchika [Tekst] / M. F. Barshteyn, N. M. Borodachev, L. KH. Blyumin [i dr.] ; pod red. B. G. Koreneva, N. M. Rabinovicha. - M. :Stroyizdat, 1981. - 215 s.
2. Almazov, V.O. Problemy soprotivleniya zdaniy progressiruyushchemu razrusheniyu [Tekst] / V.O. Almazov, A.I. Plotnikov, B.S. Rastorguyev // Vestnik MGSU. - 2011. - № 2-1. - S. 16-20.
3. Rastorguyev, B.S. Metody rascheta zdaniy na ustoychivost' protiv progressiruyushchego razrusheniya [Tekst] / B.S. Rastorguyev // Vestnik Otdeleniya stroitel'nykh nauk Rossiyskoy akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk. - 2009. - № 13. - S. 15-20.
4. Rastorguyev, B.S. Obespecheniye zhivuchesti zdaniy pri osobykh dinamicheskikh vozddeystviyakh [Tekst] / B.S. Rastorguyev // Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy. - 2003. - №4. - S. 45-48.

5. Popov, N.N. Raschet konstruktsey na dinamicheskiye i spetsial'nyye nagruzki [Tekst] / N.N. Popov, B.S. Rastorguyev, A.V. Zabegayev. – M.: Vysshaya shkola, 1992. – 319 s.
6. Tamrazyan, A.G. Raschet vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov na kratkovremennuyu dinamicheskuyu nagruzku [Tekst] / A.G. Tamrazyan, L.A. Avetisyan // Stroitel'stvo: nauka i obrazovaniye. - 2013. - № 4. - S. 2.
7. Parfenov, S.G. Metodika chislennogo rascheta sterzhnevnykh sistem na seysmicheskiye vozdeystviya s uchetom podatlivosti osnovaniya [Tekst] / S.G. Parfenov, A.G. Tamrazyan, P.A. Buro, I.V. Chernyy // Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i transport. - 2007. - № 4-16. - S.55-57.
8. Tamrazyan, A.G. Dinamicheskaya ustoychivost' szhatogo zhelezobetonno elementa kak vyazkouprugogo sterzhnya [Tekst] / A.G. Tamrazyan // Vestnik MGSU. - 2011. - № 1-2. - S.193-196.
9. Tamrazyan, A.G. Eksperimental'nyye issledovaniya vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzheniyyakh v usloviyakh ognevnykh vozdeystviy [Tekst] / A.G. Tamrazyan, L.A. Avetisyan // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. - 2014. - № 4. - S. 24-28.
10. Rastorguyev, B.S. Avarii i katastrofy. Preduprezhdeniye i likvidatsiya posledstviy [Tekst] / B.S. Rastorguyev // Dinamika zhelezobetonnykh plit pri vzryvnykh nagruzkakh. / pod. red. V.A. Kotlyarevskogo[i dr.]. –Tom 6. – M.: Izdatel'stvo ASV, 2003. – S. 343-365.
11. Tamrazyan, A.G. Nadezhnost' i zashchita moskovskikh massovykh seriy ot progressiruyushchego obrusheniya pri CHS prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera [Tekst] / A.G. Tamrazyan // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti : Nauch.-prakt. i ucheb.-metod. zhurn. - 2002. - N1. - S. 35 -38.
12. Zharnitskiy, V.I. Razvitiye teorii rascheta uprugoplasticheskikh zhelezobetonnykh konstruktsey na osobye dinamicheskiye vozdeystviya [Tekst]: Diss. dokt. tekhn. nauk 05.23.01 / V.I. Zharnitskiy- M: MISI, -1988.
13. Khurshudyan, As. ZH. Metod Bubnova–Galerkina v zadachakh upravleniya bilineynymi sistemami [Tekst] / As. ZH. Khurshudyan // Avtomat. i telemekh. - 2015. - № 8. – S. 46–55
14. Rastoruyev, B.S. Otsenka bezopasnosti zhelezobetonnykh konstruktsey pri chrezvychaynykh situatsiyakh tekhnogennogo kharaktera [Tekst] / B.S. Rastoruyev, D.S. Vanus // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2014. – №6 (56).

**D.S. Vanus**

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

Candidate of Techn. Science, Associated Prof. of the Reinforced Conrete and Masonry Structures Department

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

**АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО**

УДК 534.2

АНТОНОВ А.И., ЛЕДЕНЕВ В.И., ЯРОВАЯ Т.С.

**РАСЧЕТЫ ШУМА ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ БЛАГОУСТРОЙСТВЕ  
В ПОМЕЩЕНИЯХ С МАССОВЫМ ПРЕБЫВАНИЕМ ЛЮДЕЙ**

*В общественных зданиях различного назначения имеются помещения с массовым пребыванием людей. От одновременно разговаривающих людей в таких помещениях создаются высокие уровни шума, влияющие на здоровье длительно находящихся в них людей, ухудшающие разборчивость речи. Для оценки влияния этого шума на акустические качества среды помещений и разработки мер по их акустическому благоустройству необходимо иметь методы расчета шума, возникающего в помещениях с массовым пребыванием людей. В статье предложены методы расчета прямого звука и отраженного шума от людей как от равномерно распределенных по помещению источников. Методы учитывают особенности излучения звуковой энергии людьми как источниками шума и их влияние на формирование шумового режима помещений. Предложенные методы расчета дадут возможность производить оценку акустических качеств в помещениях с массовым пребыванием людей и целенаправленно регулировать их за счет применения звукопоглощения помещений.*

**Ключевые слова:** помещения с массовым пребыванием людей, источники шума, расчет шума, акустическое благоустройство.

В общественных зданиях различного функционального назначения имеются помещения с массовым пребыванием людей. К ним относятся здания учебного, торгового, спортивного, зрелищного назначения, вокзалы, пешеходные переходы и т.п. В таких помещениях достаточно часто возникают повышенные уровни шума, создающие помехи для нормального протекания функционального процесса и оказывающие негативное воздействие на здоровье находящихся в этих помещениях посетителей.

Основной причиной шума в большинстве случаев является разговор людей. Возникающая при этом звуковая энергия вызывает ухудшение разборчивости речи, что ведет к повышению громкости разговоров и, как следствие, к дальнейшему росту шума и увеличению его негативного воздействия.

Многие помещения с массовым пребыванием людей оборудуются системами речевого оповещения информационного типа. Для надежного восприятия информации необходима достаточно высокая её разборчивость, которая во многом определяется отношением уровней звукового давления, создаваемых системами звукоусиления, и уровней фонового шума. Как известно, количество и расположение оповещателей зависят от размеров помещения, от количества находящихся в них посетителей, от акустических характеристик помещения, определяющих гулкость, от уровня фонового шума и от других условий, влияющих на процесс формирования шумового режима в помещениях [1, 2, 3].

Для создания благоприятных акустических условий в таких помещениях и ограничения воздействующих на организм человека уровней шума требуется выполнение расчетов шума, возникающего в помещениях от разговаривающих людей как от источников шума, имеющих свои характерные особенности. В данной статье рассматриваются методы расчета прямого и отраженного шума, разработанные нами для помещений с массовым пребыванием людей.



Шумовой режим в помещениях с массовым пребыванием людей создается разговаривающими людьми. Люди, как источники шума, имеют ряд особенностей, которые следует учитывать при расчетах шума. К ним относятся: случайное положение говорящих людей за счет их постоянного перемещения в пространстве; непостоянство и прерывистость речи; случайное направление излучаемой энергии; зависимость акустических характеристик речи (спектральный состав, направленность излучения энергии, уровень акустической мощности) от возраста, пола и индивидуальных особенностей говорящего человека. К случайным характеристикам также относится количество одновременно разговаривающих людей. В практике используются осредненные характеристики речи [4].

Для расчета шума необходимо иметь сведения об акустической мощности источника шума, в данном случае говорящего человека, и направленность излучения.

Акустическая мощность говорящего человека как точечного источника звука определяется из выражения

$$L_{WP} = L_P - 10 \lg \left( \frac{\Phi}{4\pi R^2} \right), \quad (1)$$

где  $\Phi$  - фактор направленности излучения звуковой энергии;  $R$  - расстояние от источника до расчетной точки;  $L_P$  - спектральная характеристика речевого сигнала на расстоянии  $R = 1$  м от источника.

Величина  $L_P$  приведена в [4] в зависимости от уровня речевых сигналов: тихая речь -  $L_s = 64$  дБ; речь средней громкости -  $L_s = 70$  дБ; громкая речь -  $L_s = 76$  дБ, где  $L_s$  - уровень речевых сигналов с линейным усреднением, и частотной полосы анализа шума.

Фактор направленности речи согласно [5] определяется выражением

$$\Phi = 0.3525 (1 + \cos(\theta / 2))^2. \quad (2)$$

где  $\theta$  – угол между акустической осью источника и направлением на расчетную точку.

Таким образом, уровень звуковой мощности разговаривающего человека при  $\theta = 0$  и  $R = 1$  м в зависимости от уровня речевого сигнала и частотной полосы анализа с учетом выражения (2) определяются как

$$L_{WP} = L_P + 9.5 \quad (3)$$

и, соответственно, величина акустической мощности равна

$$W_p = W_0 10^{0.1 L_{WP}}, \quad (4)$$

где  $W_0 = 10^{-12}$  Вт - пороговое значение акустической мощности.

Важным фактором, влияющим на шумовой режим в местах с массовым пребыванием людей, является количество одновременно говорящих людей. Согласно данным, приведенным в работе [6], в таких помещениях как залы железнодорожных вокзалов в большинстве случаев одновременно разговаривают 40-50 % посетителей, в тоже время в залах ожидания пассажиров процент разговаривающих меньше – 20-30%. Нами установлено, что в рекреационных помещениях школ во время перерывов процент разговаривающих детей может достигать 80-85%. При этом уровень речи соответствует громкой речи.

Следует отметить, что в настоящее время требуется проведение обширных исследований по установлению акустической мощности разговаривающих людей и коэффициентов одновременности речи для различных групп помещений с массовым пребыванием людей.

Основываясь на изложенном, ниже предлагаются методы расчета прямого и отраженного шума в помещениях, возникающего от распределенных источников.

*Расчет прямого звука.* Перемещение людей и излучение ими звуковой энергии можно представить в виде случайного процесса элементарных точечных излучателей [7, 8]. В этом случае, при большом количестве одновременно разговаривающих людей и равновероятности излучения ими звукового сигнала излучаемую энергию можно равномерно распределить по плоскости помещения и рассматривать ее как плоский источник с известной поверхностной акустической мощностью  $W''$ .

Величина поверхностной акустической мощности в том случае составляет

$$W'' = \frac{W_0 N 10^{0.1 L_{WP}}}{S}, \quad (5)$$

где  $N$  – количество источников сигнала (разговаривающих людей);  $S$  – площадь, занятая источниками.

Плотность звуковой энергии в расчетной точке будет определяться путем интегрирования выражения

$$\varepsilon_{np} = \int_{S_0} \frac{W'' \Phi}{4\pi r^2 c} dS, \quad (6)$$

где  $r$  – расстояние от элемента  $dS$  до расчетной точки;  $c$  – скорость звука в воздухе.

Для определения уровня звукового давления в расчетной точке можно применить численное интегрирование [9]. Для этого необходимо исходную плоскость  $S$  разбить сеткой на  $K$  элементов равной площади и суммировать звуковую энергию, приходящую в расчетную точку от каждого элемента как от точечного источника.

Решение этой задачи реализуется нами с использованием разработанной компьютерной программы численным методом.

Величина плотности звуковой энергии определяется на основе суммирования ряда

$$\varepsilon_i = \sum_{k=1}^K \frac{\Phi W_0 N 10^{0.1 L_{WP}}}{4\pi r_{ki}^2 c K}, \quad (7)$$

где  $r_{ki}$  – расстояние от центра  $k$ -го элемента до  $i$ -й расчетной точки.

Уровень звукового давления в  $i$ -ой точке соответственно определяется по формуле

$$L_i = L_{WP} + 10 \lg\left(\frac{\Phi N}{4\pi K}\right) + 10 \lg\left(\sum_{k=1}^K \frac{1}{r_{ki}^2}\right). \quad (8)$$

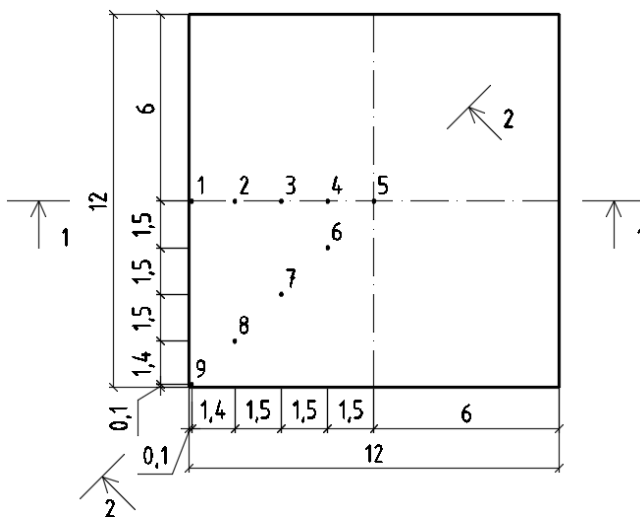


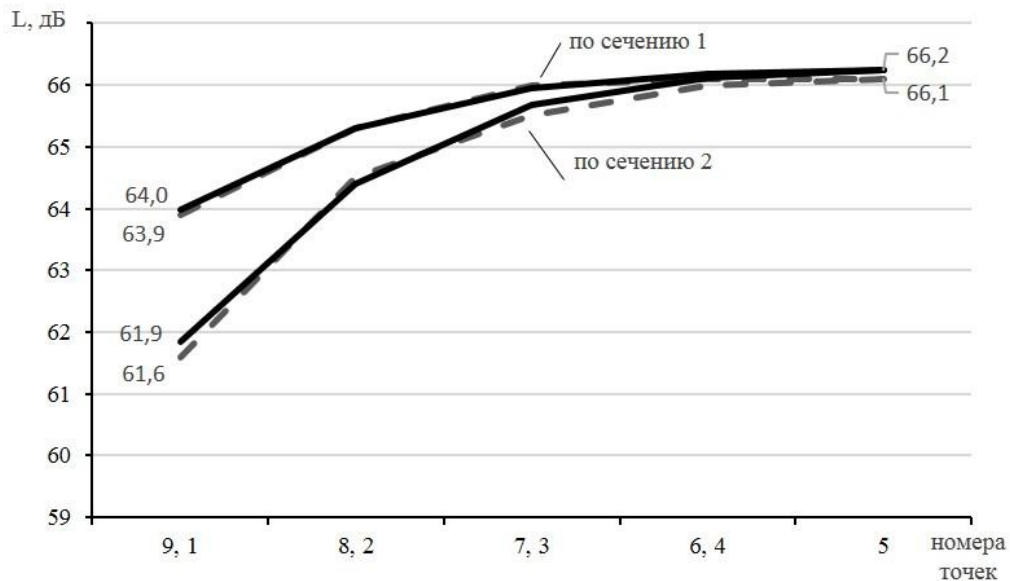
Рисунок 1 – Расчетная схема помещения с положением расчетных точек (1÷9 – номера расчетных точек)

Предложенный метод расчета наиболее эффективен при большом количестве источников шума и в больших по площади помещениях. В случае небольшого количества посетителей в помещениях и при их небольших размерах расчеты можно выполнять путем прямого компьютерного моделирования, основанного на определении уровней звукового давления прямого звука от каждого разговаривающего человека как от точечного источника. При этом все люди случайным образом расставляются по залу достаточно большое количество раз, а их координаты устанавливаются с помощью функции случайных чисел с равномерным распределением вероятности событий. Этот метод может быть использован как для оценки уровней шума непосредственно, так и для проверки других методов расчета.

Выполнен расчет шума от 36 человек, находящихся в помещении железнодорожного вокзала размерами  $a \times b \times h = 12 \times 12 \times 3$  м. Учитывая, что коэффициент одновременности разговора  $K_{од} = 0.5$  [6], одновременно общаются между собой  $N = 18$  человек. Речь средней громкости с линейным по энергии уровнем  $L_s = 70$  дБ. Согласно [4] на частоте  $f = 500$  Гц  $L_p = 66$  дБ и соответственно  $L_{WP} = 75.5$  дБ. Схема помещения с указанием расчетных точек дана на рисунке 1.

Результаты расчета уровней прямого звука показаны на рисунке 2. На этом же графике показаны перепады уровней для характерных расчетных точек:  $\Delta L_{19} = 2.1$  дБ,  $\Delta L_{15} = 2.2$  дБ и  $\Delta L_{59} = 4.3$  дБ.

Для сравнения на графике приведены также результаты прямого компьютерного моделирования.



**Рисунок 2 – Графики рассчитанных уровней давления прямого звука:**  
сплошная линия – численный метод; пунктирная линия – метод прямого компьютерного моделирования  
(положение сечений 1 и 2 показано на рисунке 1)

Максимальная разница уровней прямого звука в расчетных точках помещения, полученных данными методами, составляет 0.3 дБ, что говорит о достаточной точности предложенного метода расчета.

Предложенный метод расчета прямого звука на основе усреднения распределения источников сигнала обеспечивает возможность последующего нахождения отраженной составляющей звуковой энергии внутри помещений.

**Расчет отраженного шума.** Расчет отраженного шума в помещениях с массовым пребыванием людей может быть выполнен методами геометрической и статистической теорий акустики помещений [11]. Следует отметить, что в случае распределенных по помещению источников, когда длины пробега при зеркальном и диффузном отражениях звука от ограждений примерно равны [12], расчеты геометрическими и статистическими методами будут иметь примерно одинаковую точность. Следовательно, в этом случае для расчета отраженного шума удобнее использовать наиболее простой статистический метод диффузного поля. Расчет уровней звукового давления отраженной звуковой энергии в этом случае будет производиться по формуле

$$L_{om} = L_{wp} + 10 \lg \left( \frac{4N(1 - \bar{\alpha})}{\bar{\alpha}S} \right), \quad (9)$$

где  $\bar{\alpha}$  – средний коэффициент звукопоглощения поверхностей помещения;  $S$  – площадь внутренних поверхностей помещения.

Ниже приведен пример расчета шума для ранее рассмотренного помещения при коэффициентах звукопоглощения стен –  $\alpha = 0.1$ , пола –  $\alpha = 0.15$ , потолка –  $\alpha = 0.5$ . Средний коэффициент звукопоглощения ограждений –  $\bar{\alpha} = 0.25$ .

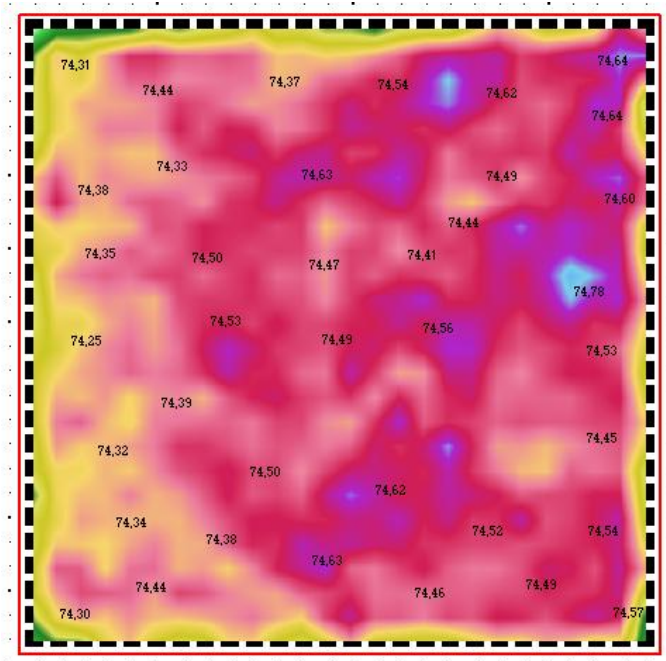
Согласно (3) уровень отраженного звукового давления отраженного шума равен

$$L_{om} = 75.5 + 10 \lg \left( \frac{4 \cdot 18(1 - 0.25)}{0.25 \cdot 432} \right) = 72.4 \text{ дБ}.$$

Здесь площадь поверхностей ограждений равна  $S=2(12 \times 12 + 2 \times 12 \times 3) = 432 \text{ м}^2$ .

С учетом ранее определенного уровня прямого звука (см. рисунок 2) уровень звукового давления в центре помещения будет равен

$$L = 10 \lg (10^{0.1 \cdot 66.1} + 10^{0.1 \cdot 72.4}) = 73.3 \text{ дБ}.$$



**Рисунок 3** – Шумовая карта помещения с равномерно распределенными источниками шума, рассчитанная методом прослеживания лучей при зеркальном отражении звука от ограждений

Для сравнительной оценки точности диффузного метода был произведен расчет уровней шума в данном помещении методом прослеживания лучей при зеркальной модели отражения звука от ограждений. В этом случае плоский источник шума, представляющий собой группу равномерно распределенных по помещению говорящих людей, был заменен на 70 точечных источников шума с равномерной по пространству диаграммой излучения. Каждый точечный источник излучал 500 лучей, которые прослеживались до уменьшения их энергии в  $10^6$  раз [13]. Полученное распределение шума в помещении приведено на рисунке 3.

На карте видны локальные провалы и увеличения уровней звукового давления из-за дискретности принятой модели метода прослеживания лучей. В тоже время звуковое поле можно считать достаточно равномерным. Полученные уровни звукового давления изменяются в пределах 0.4 дБ. Результаты хорошо со-

гласуются с методом диффузного поля и, следовательно, его можно использовать при практических расчетах отраженного шума в помещениях с массовым пребыванием людей.

Таким образом, при оценке распределения шума в помещениях с массовым пребыванием людей возможно использовать предложенные нами методы расчета, и именно, производить расчеты прямого звука численным методом, реализующим уравнение (6), а расчеты отраженного шума статистическим методом диффузного поля.

С использованием этих методов при проектировании речевого оповещения можно оценивать уровни ожидаемого фоновых шума и, соответственно, степень разборчивости транслируемой через системы звукоусиления речи.

Методы дают возможность производить оценку акустических качеств в помещениях с массовым пребыванием людей и целенаправленно их регулировать за счет применения звукопоглощения помещений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асминин В.Ф. Роль речевого оповещения и анализ его качественных характеристик, влияющих на обеспечение успешной эвакуации людей при пожаре / В.Ф. Асминин, Е.Н. Епифанов, А.И. Антонов, В.Я. Манохин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. - 2012. № 4 (28). С. 142-149.

2. Асминин В.Ф. Методика акустического проектирования одиночного пожарного речевого оповещателя / В.Ф. Асминин, Е.Н. Епифанов, А.И. Антонов, С.Н. Кузнецов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. - 2013. № 3 (31). С. 121-127.
3. Асминин В.Ф. Анализ методик размещения оповещателей систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре / В.Ф. Асминин, А.И. Антонов, Е.Н. Епифанов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. - 2014. Т. 1. № 1 (5). С. 232-234.
4. Железняк В.К. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации / В.К. Железняк, Ю.К. Макаров, А.А. Хорев // Специальная техника. - 2000. №4. С. 39-45.
5. Макриненко Л.И. Акустика помещений общественных зданий / Л.И. Макриненко. - Москва: Стройиздат, 1986. - 173 с.
6. Прасол В.М. Влияние шумового режима на архитектурно-планировочное решение железнодорожных вокзалов: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук (05.23.10). - Москва, 1985. - 24 с.
7. Булавин Л.А. Компьютерное моделирование физических систем / Л.А. Булавин, Н.В. Выгорницкий, Н.И. Лебовка // Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект». - 2011. - С. 352.
8. Самарский А.А. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. М.: Наука Физматлит. - 1997. - 320 с.
9. Яровая Т.С. Математическое моделирование прямого звука при экологической оценке шумового режима в зданиях с массовым пребыванием людей / Т.С. Яровая, А.И. Антонов // В. И. Вернадский: устойчивое развитие регионов. Материалы Международной научно-практической конференции. - 2016. - С. 204-210.
10. Антонов А.И. Метод расчета шума в плоских производственных помещениях с равномерно распределенным в них шумным оборудованием / А.И. Антонов, А.Ф. Зубков, В.И. Леденев, И.В. Матвеева // Научный журнал строительства и архитектуры. - 2016. № 4 (44). С. 21-29.
11. Антонов А.И. Математическое моделирование процессов распространения звуковой энергии в зданиях / А.И. Антонов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. -2014. № 3 (53). С. 17-23.
12. Леденев В.И. Статистические энергетические методы расчета шумовых полей при проектировании производственных зданий. / В.И. Леденев // Тамбов: Изд-во Тамб.гос.техн.ун-та. - 2000. - 156 с.
13. Forsberg P.A. Fully discrete ray tracing / P.A. Forsberg // Applied Acoustics. - 1985. V.18, No. 6. Pp. 393-397.

**Антонов Александр Иванович**

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов  
Доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Архитектура и строительство зданий»  
E-mail: [aiant58@yandex.ru](mailto:aiant58@yandex.ru)

**Леденев Владимир Иванович**

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов  
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги», советник РААСН  
E-mail: [gsiad@mail.tambov.ru](mailto:gsiad@mail.tambov.ru)

**Яровая Татьяна Сергеевна**

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов  
Магистрант кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги»  
E-mail: [semshudes@yandex.ru](mailto:semshudes@yandex.ru)

---

A.I. ANTONOV, V.I. LEDENEV, T.S. YAROVAYA

**CALCULATION OF NOISE IN ACOUSTIC IMPROVEMENT  
IN PREMISES WITH THE MASS STAY OF PEOPLE**

*In public buildings for various purposes there are rooms with a massive stay of people. From simultaneously talking people in such premises, high noise levels are created, affecting the health of long-term people in them, worsening the intelligibility of speech. To assess the influence of this noise on the acoustic quality of the environment of the premises and the development of measures for their acoustic improvement, it is necessary to have methods for calculating the noise that occurs in rooms with a large population of people. The article proposes methods for calculating direct sound and reflected noise from people as from sources uniformly distributed over the room. The methods take into account the peculiarities*

*of the radiation of sound energy by people as sources of noise and their influence on the formation of the noise regime of premises. The proposed methods of calculation make it possible to evaluate the acoustic qualities in rooms with a mass stay of people and to control them purposefully through the use of sound absorption of premises.*

**Keywords:** rooms with mass stay of people, noise sources, noise calculation, acoustic improvement.

## BIBLIOGRAPHY

1. Asminin V.F. Rol' rechevogo opoveshcheniya i analiz yego kachestvennykh kharakteristik, vliyayushchikh na obespecheniye uspezhnoy evakuatsii lyudey pri pozhare / V.F. Asminin, Ye.N. Yepifanov, A.I. Antonov, V.YA. Mano-khin // Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura. - 2012. № 4 (28). S. 142-149.
2. Asminin V.F. Metodika akusticheskogo proyektirovaniya odinochnogo pozhnogo rechevogo opoveshchate-lya / V.F. Asminin, Ye.N. Yepifanov, A.I. Antonov, S.N. Kuznetsov // Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura. - 2013. № 3 (31). S. 121-127.
3. Asminin V.F. Analiz metodik razmeshcheniya opoveshchateley sistem opoveshcheniya i upravleniya evakuatsiyey lyudey pri pozhare / V.F. Asminin, A.I. Antonov, Ye.N. Yepifanov // Pozhnaya bezopasnost': problemy i perspektivy. - 2014. T. 1. № 1 (5). S. 232-234.
4. Zheleznyak V.K. Nekotoryye metodicheskiye podkhody k otsenke effektivnosti zashchity rechevoy informa-tsii / V.K. Zheleznyak, YU.K. Makarov, A.A. Khorev // Spetsial'naya tekhnika. - 2000. №4. S. 39-45.
5. Makrinenko L.I. Akustika pomeshcheniy obshchestvennykh zdaniy / L.I. Makrinenko. - Moskva: Stroyiz-dat, 1986. - 173 s.
6. Prasol V.M. Vliyaniye shumovogo rezhima na arkhitekturno-planirovochnoye resheniye zheleznodorozh-nykh vokzalov: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk (05.23.10). - Moskva, 1985. - 24 s.
7. Bulavin L.A. Komp'yuternoye modelirovaniye fizicheskikh sistem/ L.A. Bulavin, N.V. Vygornitskiy, N.I. Lebovka // Dolgoprudnyy: Izdatel'skiy Dom «Intelekt». - 2011. - S. 352.
8. Samarskiy A.A. Matematicheskoye modelirovaniye. Idei. Metody. Primery / A.A. Samarskiy, A.P. Mikhaylov. M.: Nauka Fizmatlit. - 1997. - 320 s.
9. Yarovaya T.S. Matematicheskoye modelirovaniye pryamogo zvuka pri ekologicheskoy otsenke shumovogo rezhima v zdaniyakh s massovym prebyvaniyem lyudey / T.S. Yarovaya, A.I. Antonov // V. I. Vernadskiy: ustoychivoye razvitiye regionov. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. - 2016. - S. 204-210.
10. Antonov A.I. Metod rascheta shuma v ploskikh proizvodstvennykh pomeshcheniyakh s ravnomerno raspre-delen-nyy v nikh shumnyy oborudovaniyem / A.I. Antonov, A.F. Zubkov, V.I. Ledenev, I.V. Matveyeva // Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury. - 2016. № 4 (44). S. 21-29.
11. Antonov A.I. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov rasprostraneniya zvukovoy energii v zdani-yakh / A.I. Antonov // Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo. -2014. № 3 (53). S. 17-23.
12. Ledenev V.I. Statisticheskoye energeticheskoye metody rascheta shumovyykh poley pri proyektirovanii proizvodstvennykh zdaniy. / V.I. Ledenev // Tambov: Izd-vo Tamb.gos.tekhn.un-ta. - 2000. - 156 s.
13. Forsberg P.A. Fully discrete ray tracing / P.A. Forsberg // Applied Acoustics. - 1985. V.18, No. 6. Pp. 393-397.

### A.I. Antonov

Tambov State Technical University, Tambov  
Doctor of Technical Sciences, Associate professor «Architecture and building construction»  
E-mail: [aiant58@yandex.ru](mailto:aiant58@yandex.ru)

### V.I. Ledenev

Tambov State Technical University, Tambov  
Doctor of Technical Sciences, professor, professor of Department "Urban construction and roads", advisor to RAACS  
E-mail: [gsiad@mail.tambov.ru](mailto:gsiad@mail.tambov.ru)

### T.S. Yarovaya

Tambov State Technical University, Tambov  
Master of the Department "Urban construction and roads"  
E-mail: [semshudes@yandex.ru](mailto:semshudes@yandex.ru)



УДК 712.00.01.03.2.

ЕНИН А.Е., ГРОШЕВА Т.И.

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РЕКОНСТРУКЦИИ ЛАНДШАФТНО-РЕКРЕАЦИОННЫХ ПРОСТРАНСТВ

*Человек с самых древних времен отводил разные роли ландшафтно-рекреационным пространствам (ЛРП). Все это было продиктовано особенностями исторических эпох. Краткий анализ ЛРП города Воронежа, показал, как менялось планировочное решение, как исторические условия влияли на планировочную структуру. В статье сделана попытка сформулировать системную классификационную модель ЛРП на иерархическом градостроительном уровне - «город». Системный подход к проблеме реконструкции общественных рекреационных пространств, как одного из основных элементов городской застройки, позволит определить и научно обосновать место и значение данного специфического и недостаточно изученного вида деятельности по гармонизации взаимосвязи и взаимовлияния населения и рекреационной среды его обитания.*

*В современном мире новых технологий и автоматизированных процессов любое пространство будет целостным, если присутствуют четыре процесса – производственные, бытовые, рекреационные и коммуникационные.*

**Ключевые слова:** реконструкция, ландшафтно-рекреационное пространство, система, методология, системные принципы, демозкосистема, моделирование, критерии, оптимизация.

Существуют апробированные разработки, свидетельствующие о том, что объектом архитектурно-градостроительной деятельности является не искусственная техническая среда, а экологическая система, основным звеном которой является население, т.е. определённое множество людей, объединяемое рядом социально-экономических, социально-культурных, и других факторов [1, 2,]. «Открытие» ОТС, приписываемое Людвигу фон Бергаланфи, следует считать несколько преувеличенным: так называемый «организмический» подход в естественных науках ещё до ОТС свидетельствовал о том, что существуют особые объекты – «организмы»... Заслуга Л. Фон Бергаланфи в том, что он на практике показал инвариантность законов, принципов, определяющих поведение («жизнедеятельность») практически всех живых и «технических» объектов, являющихся системами – т.е. он открыл изоморфизм законов (и ему принадлежит термин «система»). К ошибочному «поведению» человек привыкает: «негативные», по сути, аморальные силы, провоцируют деградацию экологической картины человеческого бытия, и подсознание человека на уровне совести уже давно бьёт тревогу, провоцируя, понуждая к познанию истинной, а не привнесённой, так называемой «комфортной» архитектурной среды обитания. Отсюда известная мудрость: хочешь познать истинность чего-либо – обратись к его истокам, первоначально, - откуда оно «пошло есть»...[3]

Ретроспективный анализ формирования представлений о сущности экологических систем населения, их поведения в изменяющихся условиях – искусственных (ИЭС) и естественных, природных (ЕЭС) экосистем является сегодня одним из неотложных и актуальных аспектов архитектурной науки. Ретроспекция – (от лат. *retro* – назад и *spesio* – смотрю) – обращение к прошлому, обзор прошедших событий.

Оказывается, что мы можем использовать «прошлое» с большой пользой. Если мы на наше «прошлое» посмотрим с позиций понимания архитектуры как системы. Вот если есть какой-то объект в «прошлом», то можем мы его целиком перенести в настоящее или не можем? Можем только в том, случае, если он является системой. Или посмотреть где та часть, которая не получается, в современном объекте, её в историческом анализируемом объекте нет, а есть в соседнем квартале. Это система. И если мы возьмём этот объект, как систему, она совершенно идентична любой современной самой сложной системе. Количество и функциональное назначение элементов архитектурной системы одинаково, инвариантно. Независимо от его крупности и функционального назначения, например – ландшафтно-рекреационные пространства.

Материально-технические и функционально-пространственные характеристики элементов и связей архитектурно-градостроительных систем (ЛРП) в процессе жизненного

цикла претерпевают количественные и качественные изменения, так называемый «моральный» и/или «физический» износ. Функциональное назначение объекта, его формы, временные характеристики изменений, финансовые, и другие параметры их преобразований, требуют системного мышления, целостного взгляда на процесс гармонизации взаимосвязи населения (человека) и среды его обитания. Этот вид архитектурно-градостроительной деятельности, в общем, его значении понимается как *реконструкция*, и имеет ряд различающихся по своей сути терминов [4, 5,]:

- *реконструкция* (от *ре...* и лат. *reconstructio* – построение) – 1) в градостроительстве – радикальное изменение планировочной структуры территорий в целях повышения функциональной комфортности их использования;

- *реновация* (лат. *renovatio* – обновление) – экономический процесс замещения или восстановления основных фондов, выбывающих из процесса жизнедеятельности в результате физического и морального износа (применительно к градостроительной продукции – то же, что и капитальный ремонт).

- *реставрация* (лат. *restauratio*) – восстановление в первоначальный вид сохранившихся, но утративших детали декора или отдельные элементы памятников истории и архитектуры.

- модернизация (фр. *moderiser*) – улучшение качества и количества услуг, повышающих комфортность и экономичность эксплуатации зданий (сооружений): 1) оснащение недостающими инженерными системами, оснащение восстанавливаемых систем оборудованием и приборами новых поколений, отвечающих прогрессивным технологиям эксплуатации и требованиям комфортности.

Термин «реконструкция» и другие приведенные выше термины касаются технической, материальной составляющей демозкосистем и не отражают системной природы этого процесса – гармонизации взаимовлияния населения и среды его обитания, важнейшей составляющей архитектурно-градостроительной деятельности.

#### **Эволюция ЛРП от древнего мира до современных городов. Зарубежный опыт. Ретроспективный анализ.**

История возникновения ЛРП уходит своими корнями в глубокую древность и насчитывает тысячелетия. Фактически, когда появился первобытный человек, он практически сразу начал возделывать землю около своего жилища. Прежде всего, это было связано с необходимостью пропитания, выращивались сельскохозяйственные культуры. Другая сфера жизни вынуждала человека устраивать так называемые сакральные урочища. Это были некие комплексы, представлявшие собой – объект природы, который выбирался по принципу красоты, или знакового природного явления, произошедшего на этом месте. Они олицетворяли божество, рядом устраивалась площадка для проведения различных ритуалов и обрядов.[6]

Одна из самых первых древних цивилизаций, которая была центром культуры древнего мира – был Египет. Именно там создание и развитие садов и парков получило свое начало как искусство. Архитектура диктовала характер ландшафтно-рекреационного окружения. Отличительной особенностью планировки садов и парков того времени были строгая геометрия и пластика. Центр композиции обычно занимал прямоугольный бассейн или пруд, – это был важный функциональный, декоративный элемент. В некоторых садах было несколько прудов, которые были соединены каналами, по ним даже можно было перемещаться на лодках.

Гораздо позднее свое развитие получило садово-парковое искусство Ассирии и Вавилона. Территория, на которой располагались эти два государства, принадлежала долине рек Тигр и Евфрат. Так как почвы были очень плодородные, то территория была насыщена различной растительностью, это позволило создавать богатые и пышные сады при дворцах и храмах. [7]

В садах Греции преобладала свободная композиция. Сады имели различное назначение. Одним из первых типов общественных садов были священные рощи героев, посаженные в честь выдающихся людей, называвшиеся герронами. Так же в садах проходили беседы философов, для них были предназначены специальные – философские парки. Некоторые храмы были окружены симметричными рядами деревьев.

Садово-парковое искусство Греции оказало сильное влияние на развитие Римских садов. В структуре городов стали появляться новые элементы - *рекреационные пространства*. В дворовых пространствах появился новый тип садов, который представлял собой геометрически правильную озелененную форму, с водоемом в центре. Такой дворик-сад назывался перистилем. Он был окружен колоннадой, имел зеленый ковер из газона с цветниками, кустарниками и небольшими деревьями. [7]

Народ Китая всегда чтит свои традиции, бережно относился к природе, они умели слушать и слышать ее, наслаждались её красотой в её первозданном виде. Архитекторы и садоводы пытались максимально сохранить пейзажи своей страны, они талантливо использовали природные условия и органично вписывали архитектурные сооружения в естественную среду. [8]

Эпоха Возрождения зародилась в Италии, Флоренция стала своеобразным центром этого периода. Живописные холмы, яркое солнце, южный климат, все это способствовало развитию искусства. Зодчие и садовники той эпохи создали удивительные творения, искусное сочетание планировки регулярного типа, архитектуры и водоемов. С приходом Барокко планировочная система парков усложнилась, появились диагональные аллеи. Период барокко господствовал с XVI до середины XVIII века. Он повлиял и на искусство других стран, например на искусство Франции.

В Европе первые пейзажные парки возникли в Англии в начале XVIII века.

#### **Отечественный опыт. Ретроспективный анализ.**

Первое упоминание относится к V веку до н.э., в котором древнегреческий историк Геродот писал о садах в долине Днепра. Позднее, летописец Нестор упоминал в своих трудах о садах Киева в XI-XII вв. Он описывал яблоневый сад Киево-Печерского монастыря, основанного в 1051 году Ярославом Мудрым.

Во второй половине XII века был заложен сад Андреем Боголюбским, в 11 км от Владимира. Позднее этот сад служил образцом при закладывании садов в Суздале, Муроме и других городах. До XIV века широкое распространение на Руси, как и в странах Западной Европы, имели монастырские сады, где разводили цветники, а так же выращивали плодовые деревья. С XVI века упоминаются сведения об аптекарских садах и огородах для разведения лекарственных растений. [9]

К XIV - XV векам монастырские сады претерпевают изменения в размерах, они становятся больше, и планировочная структура насыщается множеством декоративных элементов таких как, скамьи, фонтанчики, беседки. Просматривается тесная взаимосвязь с архитектурой самих зданий. В XVIII веке стали появляться общественные сады.

Регулярная планировка в строительстве садов и парков появилась с приходом царствования Петра I. В 1706 году был создан первый в России Ботанический сад в Москве, который сохранился до наших дней. В 1710 году Петр I учредил так называемую "Садовую контору", которая занималась вопросами отбора растений для посадок в садах и парках Санкт-Петербурга и Москвы. [9]

#### **Формирование ЛРП в структуре города Воронеж**

Частой проблемой XVI века были разрушительные пожары, это затронуло и Воронеж. Так 10 августа 1773 года пожаром был уничтожен практически весь старый центр города. В результате работ по восстановлению, его центр был смещен на северо-запад на полтора-два километра. Здесь проходила одна из главных улиц того времени - Большая Дворянская (совр. проспект Революции). В старой части города было предложено применить трехлучевую композицию, максимально используя прежнюю планировку. Эти улицы сохранились до наших дней, они отходят от Университетской площади: 9 Января, Плехановская и Володарского. Так в 1774 году Екатерина II утвердила план регулярной застройки Воронежа (Рис.1) [11]. Планировка исторического центра осталось практически без изменений до наших дней.

Один из самых первых парков, носит современное название ЦПОиК "Динамо", был создан для развития садоводства и огородничества в России. На городских картах 1850 года был отмечен как "Ботанический сад". В нём выращивалось и испытывалось около 3500 образцов растений. Незадолго до войны в этом парке были построены многие объекты, такие как: летний театр, ресторан, детская железная дорога, так же был открыт зелёный амфитеатр, разместившийся на естественных склонах оврага, со специальной открытой сценой. [12] Парк был разрушен в 1988

году. Причиной всему стала авария, возникшая в ливневой системе. Парк был затоплен, а после работ по устранению последствий все пришло в запустение. Спустя 27 лет, начались работы по его реконструкции. В 2016 году парк вновь был готов принять посетителей. Это место набирает популярность среди горожан, там проходят многочисленные фестивали, выступления музыкантов и выставки.



Рисунок 1 – Проект плана Воронежа 1774 год [10]

Еще один старинный сад - Первомайский, или его первое название - Городской сад. Был основан в 1840 году. Главный вход сохранил свое историческое положение и в наши дни - он располагается на углу проспекта Революции и улицы Феоктистова. Вход был обозначен четырьмя кирпичными столбами, напоминающими крепостные башни с зубцами. В угловой части сада располагался Летний театр, вместимостью до 600 человек. В середине сада находился ресторан. Старые постройки Городского сада существовали еще несколько лет после Октябрьской революции, но из-за их плачевного состояния, они были разобраны, а деревянный театр сгорел. На месте ресторана, где после войны 30 лет стоял цирк шапито, в 1930 году было построено новое здание

летнего театра по проекту архитектора А. И. Попова-Шамана. Оно также было полностью деревянным, но его вместимость уже была значительно больше - до 1500 зрителей. Так же там была большая механизированная сцена. Но и этот театр не сохранился, он был сожжен дотла гитлеровскими захватчиками. После войны, в 1948 году, старая ограда сада была снесена, одна из аллей отошла к улице Феоктистова, превратившись в ее тротуар, а вокруг сада была поставлена новая чугунная ограда, сделанная по проекту архитектора-художника А. В. Миронова. [12] Сейчас на территории Первомайского сада возвышается Благовещенский кафедральный собор, который возведён по проекту архитектора В. П. Шевелёва в Русско-Византийском стиле.

Официальной датой открытия Петровского сквера считают 30 августа (по старому стилю) 1860 года - дата установки памятника. Это был первый монумент, установленный в нашем городе. К нему вела центральная аллея, которая подходила к круглой цветочной клумбе и фонтану, располагавшемуся на широкой площадке. Сквер имел ограду из металла по периметру. Вокруг памятника были расставлены садовые скамейки. В 1942-1943 годах во время временной оккупации фашистскими захватчиками правобережной части Воронежа, памятник Петру был похищен и вывезен. Сквер был разбит. В результате одной из реконструкций, начатой в 1953 году, были проложены новые аллеи, сооружён многоструйный фонтан, за которым начинался красивый и широкий лестничный спуск к Мало-Чернавской улице. С 1980 года сквер объявлен дендрологическим государственным памятником природы. В 1985 году началась еще одна реконструкция. От расположенного в центре памятника Петру I лучами расходились дорожки. Поперечная ось сквера была подчеркнута фонтаном, за которым начинался лестничный спуск. Появилась невысокая ограда облицованная гранитом, вдоль ее восточной стороны были установлены чугунные пушки. Древний якорь, поднятый со дна реки, был перенесен в сторону от памятника и закреплен на забетонированной площадке. В 2006 году в связи с возведением торгово-гостиничного комплекса «Петровский Пассаж» началась еще одна реконструкция сквера. Асфальт поменяли на плитку. Памятник Петру I почистили, установили новый фонтан, пушки переложили на лафеты. Установили семьдесят скамеек и восемьдесят фонарей. В сквере появились солнечные часы. Все стилизовали под Петровскую эпоху. К сожалению, лестничный спуск не сохранили. [13]

Сад у Дома Офицеров или как его раньше называли - Сад Семейного Собрания. Вход был устроен с Большой Дворянской улицы в виде узкого прохода между домами в глубину квартала.

Сад имел небольшие размеры, но был хорошо спланирован для прогулок, с широкими аллеями. Здесь, как и в Городском саду, в стороне от главной кольцевой аллеи стоял летний театр, а в другой части сада размещалась раковина-эстрада. Только после строительства Дома Красной Армии сад расширился, был перепланирован, добавилась киноплощадка, но театр исчез. После этот сад превратился в сад Дома офицеров, включив в себя соседние зеленые площадки. [12] Планировочная схема претерпела множественные изменения и не дошла до нас в первозданном виде. Территория сильно уменьшилась, стала иметь «сквозные» аллеи, связав ул. Ф.Энгельса и проспект Революции. В сквере появился памятник М. Е. Пятницкому. По периметру расположены кафе. На территории сквера идет торговля сувенирной продукцией, здесь можно встретить много туристов.

Сад «Эрмитаж» с летним театром был открыт в 1878 году, располагался на пересечении Кирочной улицы с Тулиновским переулком (совр. улицы Никитинская и Комиссаржевской). Сад был тихий, в нем горожане отдыхали днем, а вечером слушали музыку, исполнявшуюся на специальной крытой эстраде. В саду работал ресторан, который был открыт круглый год. При оккупации Воронежа это здание было сожжено, а сад вырублен. После войны все было восстановлено и реконструировано. Здание клуба в советское время было преобразовано во Дворец культуры рабочих и служащих ЮВЖД (совр. ДК Железнодорожников), с незначительной перепланировкой сада.

Площадь Детей или первое название этого места - Острожный бугор, получено из-за возведения на этой территории деревянного острога. В XVIII веке, во время перестройки Воронежа труд заключенных использовался как бесплатная рабочая сила. В 1801 году в стороне от старого деревянного острога, на том же бугре, возвели каменную тюрьму. Позднее Николай I поручил построить новую тюрьму в другом месте. Постройка сохранилась до наших дней — это тюрьма в самом конце улицы Средне-Московской (район пл. Застава). В 1860-х мрачное здание на острожном бугре снесли, а освободившиеся земли отдали под частную застройку. [14] В 1906 году на Острожном бугре заложили сквер. В 1918 году городскими властями было принято решение дать этому месту новое название - площадь Детей. В 1974 году на холме началось строительство областного Дворца пионеров (совр. городской Дворец творчества детей и молодежи). Проект подразумевал создание зеленого театра под открытым небом, парка с фонтанами и искусственными прудами. Уже были намечены дорожки и залит остов амфитеатра. Но из-за распада СССР проект не успели завершить. И только сейчас начались работы по реконструкции этого места. По сути, это одно из немногих мест, которое изначально было заложено не как ЛРП. В ходе изменения планировочных решений города, поменялась специфика данного места.

### **Иерархия ЛРП в архитектурно-планировочной структуре городов на примере Воронежа**

Город - это живой организм, который постоянно растет и развивается. Любой город имеет многоуровневую систему ЛРП. Они имеют разный размер, назначение, играют разную функцию в жизни города. Условно можно выделить четыре уровня.

I уровень «город» - сюда можно отнести городские парки, лесопарки и лугопарки.

Как правило, это ЛРП, занимающие большую территорию и имеющие городское значение. На их территории часто проходят городские фестивали, выставки, соревнования, - массовые гуляния. В Воронеже к этой категории можно отнести - ЦПОиК «Динамо», лесопарк СОК «Олимпик».

II уровень «район» - скверы, бульвары, сад жилого района. Это ЛРП районного значения, большинство посетителей из близлежащего района. Территория отличается меньшим размером. В Воронеже к этой категории относится парк «Танаис» и «Алые паруса».

III уровень «квартал» - мини-сквер, малый сад, зеленая зона ЖК. Это *локальные озелененные участки, в которых преобладают транзитные потоки посетителей*. Чаще всего они служат для прогулок родителей с малышами, домашними питомцами. В них может быть обустроена детская площадка, зона ожидания - с лавочками. Примером в Воронеже может служить - парк «Романовский» и «Петровский» сквер. (Рис.2)



*Рисунок 2 - Иерархия ЛРП в архитектурно-планировочной структуре города Воронеж*

IV уровень «жилой дом» - палисадник, веранда, зимний сад, лоджия, сад на крыше (эксплуатируемая кровля). Примеры этих ЛРП можно найти в любом жилом доме и квартире. Это частные пространства, как правило, созданные собственниками для личного пользования и релаксации.

#### **Факторы, влияющие на формирование ЛРП в структуре городов**

Ландшафтно-рекреационное пространство (от лат. *hescratio* — восстановление) — территория, включающая в себя городские лесопарки и лугопарки, лесозащитные зоны, городские сады, парки, гидропарки, бульвары, скверы и др. Действие данной среды направлено на оздоровление, отдых, восстановление работоспособности и психического здоровья человека. Как правило, рекреационную зону размещают в структуре селитебной зоны или вблизи от нее, тем самым формируя систему открытых пространств.

Ландшафтно-рекреационная среда формируется и функционирует под влиянием нескольких групп факторов.

Рассмотрим, как некоторые факторы влияют на формирование ЛРП. Безусловно, на формирование ландшафтно-

рекреационных зон прямое влияние оказывают природно-климатические и ландшафтно-экологические факторы. Воронеж расположен в зоне умеренного климата, в центральной полосе России. Среднегодовая температура здесь составляет 6,9 градусов по Цельсию. Среднее количество солнечных дней в году - 158. Растительность типична для климатических условий. В целом - есть все предпосылки и природные условия для комфортного проживания человека.

Рассмотрим ландшафтно-экологические факторы. Одна из проблем больших городов - состояние экологической обстановки и показателей загрязнения воздуха. Ведь быстрые темпы роста строительства в современных городах с одной стороны делают город привлекательным для инвесторов. А с другой - снижают его привлекательность для потенциального жителя, так как, чаще всего, сокращается количество зеленых насаждений, видоизменяется естественный природный ландшафт города, экологическая обстановка претерпевает изменения не в лучшую сторону.

Так в Воронеже за последние десятилетия значительно ускорился темп роста жилищного строительства и заметно сократился прирост зеленых парковых зон. Согласно исследованиям зона садово-парковых насаждений в процентном соотношении от общей площади города сократилась с 17 до 13,6 процента. [15]

В современном мире темпы роста психоневрологических расстройств значительно увеличились. Около 14% всех болезней относят к психоневрологическим расстройствам, расстройствам, связанных со злоупотреблением алкоголя, наркотических и психотропных веществ. Так, согласно данным Всемирной организации здравоохранения, с 1990 по 2008 г. число больных с психическими расстройствами и расстройствами поведения выросло на 20%. Как это ни печально, но в крупных городах зафиксирован высокий уровень заболевания населения онкологическими патологиями. Распространенность болезни в городах с 1990 года превысила отметку в 30%. [16] Конечно же, особое внимание обращает на себя здоровье молодого подрастающего



поколения. Организм ребенка наиболее уязвим и подвержен воздействиям внешних факторов окружающей среды. К 2009 году детская заболеваемость выросла на 30%. Не удивительно, что одно из распространенных заболеваний - болезни органов дыхания.

К сожалению, в настоящее время синонимом термина "большой город" является, - "стресс", это постоянная спешка, гонка со временем. Большой город подразумевает большие возможности для человека, но чтобы успеть везде приходится жертвовать собственным здоровьем, нерегулярное питание, нервные переживания. Все это сказывается на состоянии здоровья. Зафиксирован рост числа сердечнососудистых заболеваний людей, которые проживают в больших городах.

Миллиардные ассигнования на традиционное здравоохранение, по данным американских учёных, являются бессмысленными и с количественной, и с качественной точек зрения. Оказывается, что даже при таких астрономических цифрах бюджетных «инъекций» всё возрастающую массу больных спасти невозможно. Оздоровить и вылечить человечество может лишь Природа, своими средствами естественной, ландшафтной рекреации [17].

Так же стоит отметить, что давно известный факт, что находясь в зоне с зелеными насаждениями, происходит психо-эмоциональная разрядка человека, снимается нервное напряжение. Время, которое человек проведет в парке или за городом на природе, благополучно скажется на его здоровье.

Цветотерапия или хромотерапия широко применяется в медицине. Зеленых цвет, как и шум листвы благотворно влияет на здоровье человека, физиологически оптимален. У человека уменьшается кровяное давление, расширяются капилляры, уменьшает мигрень, повышается мышечная работоспособность на долгое время. Зеленый цвет оказывает освежающее и одновременно успокаивающее действие на организм, проявляет антисептические свойства, рекомендуется при лечении нервной и сердечнососудистой системы, астме, бессонницы. Ароматы цветов, шум листвы и пение птиц (как акустическое влияние на человека), цветотерапия - это все можно отнести к фармакологическому фактору влияния на создание ЛРП. Так же ЛРП в структуре городов способствуют очищению воздуха от загрязнений, играют роль шумо и ветрозащиты, обогащают воздух естественными природными веществами и запахами (в период цветения).

Эстетическая составляющая восприятия ЛРП играет немаловажную роль в их формировании и популярности среди населения. Сквер или парк должен гармонично вписываться в городскую застройку и быть приятным взгляду человека. Так же на увеличение транзитного потока и наполняемости посетителей влияет так называемый коммуникационный фактор. Сюда можно отнести наличие зон wi-fi, павильонов с уличной едой, фонтанов с питьевой водой, детских и спортивных площадок. Транспортная и пешеходная доступность увеличит «популярность» данного пространства. Примером такого ЛРП в структуре Воронежа может служить Кольцовский сквер и парк им. Дурова. В них значительно заметнее увеличен транзитный поток пешеходов, люди предпочитают пройти через сквер к остановкам общественного транспорта, сократить путь и заодно пройти по парку.

### **Выводы**

Краткий ретроспективный анализ показал, что человек с самых древних времен отводил разные роли ЛРП. Все это было продиктовано исторической эпохой того времени. Сначала это были сакральные урочища, места поклонения божеству, затем ЛРП представляли собой некую модель рая, монастырские и аптекарские сады, и наконец появились декоративные сады.

Краткий анализ ЛРП города Воронежа, показал, как менялось их планировочное решение, как исторические условия влияли на планировочную структуру.

В результате использования системного анализа и системного подхода предложена классификационная модель ЛРП в системе «город».

В современном мире новых технологий и автоматизированных процессов любое пространство, созданное архитектором «должно работать» и отвечать критерию целостности. В результате анализа выявлены необходимые универсальные сочетания факторов – производственных, бытовых, рекреационных и коммуникационных.

Результаты данной работы представляют интерес для теории и проектной практики, а также при подготовке научно-методического обеспечения учебного процесса в архитектурно-строительной высшей школе.

Существующая теория и практика архитектуры и градостроительства свидетельствует о том, что реконструкция городов и их элементов, особенно общественных ландшафтно-рекреационных пространств, не соответствует экологическим требованиям: все серьезные и массовые заболевания людей, проживающих на урбанизированных территориях, имеют средовую этиологию – как результат методологических ошибок: а) несоответствие «технической» трактовки объекта архитектурной деятельности его системной природе (сущности); б) применяемая так наз. «комплексная» методологическая концепция не адекватна системной природе объектов типа «население↔среда».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаврик Г.И. Методологические основы исследования архитектурных систем [Текст]: дис...д-ра архитектуры: 18.00.01: утв. 20.02.81/Лаврик Геннадий Иванович. – К., 1979. – 251 с.
2. Лаврик Г.И. Место и значение районной планировки в гармонизации среды жизнедеятельности [Текст] / Г.И. Лаврик, В.В. Перцев // Здоровье населения - стратегия развития среды жизнедеятельности: в 2 т.: сб. ст. к Общему собранию РААСН / БГТУ им. В.Г. Шухова. - Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. Т.2. С. 19-29.
3. Енин А.Е. Понятие эксперимента в архитектуре как деятельности, направленной на гармонизацию взаимосвязи и взаимовлияния населения и среды его жизнедеятельности [Текст]: Градостроительство. 2012. № 4 (20). С. 22-29.
4. Словарь иностранных слов / Изд. 3-е. - М.: Госизд. иностр. и нац. слов., 1949. - 801 с.
5. Советский энциклопедический словарь / Изд. 4-е. - М.: Сов. энцикл., 1989. - 1632 с.
6. Афонина М.И. Основы городского озеленения: Учебн. пос. - М.: МГСУ, 2010. - 208 с.
7. Гостев В.Ф., Юскевич Н.Н. Проектирование садов и парков: учеб. для техникумов. - М.: Стройиздат, 1991. - 340 с.: ил.
8. Горбачев В.Н. Архитектурно-художественные компоненты озеленения городов: Учеб. пособие для худож.-пром. вузов и архит. фак. - М.: Высш. шк., 1983 - 207 с., ил.
9. Горохов В.А. Зеленая природа города: Учеб. пособие для вузов. Издание 3-е, доп. и перераб. В 2-х томах. - М.: Архитектура-С, 2012. - 528 с., ил. стр. 114
10. В. Шквариков «Очерк истории планировки и застройки русских городов» Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре; Москва, 1954 г.
11. В.П. Загорский. Воронеж: историческая хроника. Воронеж. Центр.-Черноземное изд. 1989. Режим доступа: <http://www.vrn-histpage.ru/page.php?Page=64>
12. Троицкий Н., Троицкий Б. Сады и парки старого Воронежа // Истоки. - Воронеж, Центр.-Черноземное кн. изд-во, 1981.
13. Грошева Т.И., Енин А.Е. Петровский сквер - элемент системы рекреации города Воронежа (история и современность) // Архитектурные исследования: научный журнал №4(4) 2015 г. С. 79-88
14. . Енин А.Е., Грошева Т.И. Ретроспективный анализ формирования ландшафтно-рекреационных зон города Воронежа // Архитектурные исследования: научный журнал №1(1) июнь 2015 г. С. 74-80
15. Т.Б. Адоньева, Е.М. Иванова, Л.А. Калужная Зеленые насаждения города Воронежа: современное состояние, проблемы // Научный журнал ВЕСТНИК ВГУ Серия: География. Геоэкология №1, 2001 г. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/geograph/2001/01/adonjeva.pdf>
16. Маланичева Надежда Антоновна Здоровье населения крупного города // Проблемы развития территории. 2012. №1. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/zdorovie-naseleniya-krupnogo-goroda>
17. Василенко, Н. А. Системные принципы формирования ландшафтно-рекреационной среды крупного города: автореф. дис. ... канд. архитектуры: 18.00.01: защищена 26.11.09 / Н. А. Василенко. — М.: Моск. арх. ин-т, 2009. — 26 с.

### Енин Александр Егорович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж  
Кандидат архитектуры, профессор, советник РААСН, зав.кафедрой основ проектирования и архитектурной графики  
E-mail: [a\\_yenin@mail.ru](mailto:a_yenin@mail.ru)

### Грошева Татьяна Игоревна

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж  
Ассистент каф. основ проектирования и архитектурной графики  
E-mail: [tfs007@mail.ru](mailto:tfs007@mail.ru)

## A SYSTEMATIC APPROACH TO THE RECONSTRUCTION OF THE LANDSCAPE-RECREATIONAL SPACES

*People since ancient times assigned different roles of landscape-recreational spaces (LRP). All of this was dictated by the peculiarities of the historical eras. A brief analysis of city of Voronezh and showed how did planning decision as historic conditions affect the plan structure. The article attempted to formulate the system classification model of an LRS on hierarchical planning level. A systematic approach to the problem of reconstruction of public recreational spaces, as one of the main elements of city building, will identify and scientifically substantiate the place and value of this specific and insufficiently studied activity on harmonizing the relationship and interaction of the population and recreational Wednesday its Habitat. In today's world, new technologies and automated processes any space is complete, if there are four processes. -industrial, household, recreational and communications.*

**Keywords:** reconstruction, landscape-recreation space, system, methodology, system principles, the demo ecosystem modeling, optimization criteria.

### BIBLIOGRAPHY

1. Lavrik G.I. Metodologicheskiye osnovy issledovaniya arkhitekturnykh sistem [Tekst]: dis...d-ra arkhi-tektury: 18.00.01: utv. 20.02.81/Lavrik Gennadiy Ivanovich. – K., 1979. – 251 s.
2. Lavrik G.I. Mesto i znachenie rayonnoy planirovki v garmonizatsii sre-dy zhiznedeyatel'nosti [Tekst] / G.I. Lavrik, V.V. Pertsev // Zdorov'ye naseleniya - strategiya razvitiya sredy zhiznedeyatel'nosti: v 2 t.: sb. st. k Obsheemu sobraniyu RAASN / BG TU im. V.G. Shukhova. - Belgorod: Izd-vo BG TU, 2008. T.2. S. 19-29.
3. Yenin A.Ye. Ponyatiye eksperimenta v arkhitekture kak deyatel'nosti, napravlennoy na garmonizatsiyu vzaimosvyazi i vzaimovliyaniya naseleniya i sredy yego zhiznedeyatel'nosti [Tekst]: Gradostroitel'stvo. 2012. № 4 (20). S. 22-29.
4. Slovar' inostrannykh slov / Izd. 3-ye. - M.: Gosizd. inost. i nats. slov., 1949.-801s.
5. Sovetskiy entsiklopedicheskiy slovar' / Izd. 4-ye. - M.: Sov. entsikl., 1989.-1632s.
6. Afonina M.I. Osnovy gorodskogo ozeleneniya: Uchebn. pos. - M.: MGSU, 2010.-208 s.
7. Gostev V.F., Yuskevich N.N. Proyektirovaniye sadov i parkov: ucheb. dlya tekhnikumov. -M.: Stroyizdat, 1991. - 340 s.: il.
8. Gorbachev V.N. Arkhitekturno-khudozhestvennyye komponenty ozeleneniya gorodov: Ucheb, posobiye dlya khudozh.-prom. vuzov i arkh. fak. - M.: Vyssh. shk., 1983 - 207 s., il.
9. Gorokhov V.A. Zelenaya priroda goroda: Ucheb. posobiye dlya vuzov. Izdaniye 3-ye, dop. i pererab. V 2-kh tomakh. - M.: Arkhitektura-S, 2012. - 528 s., il. str.114
10. V. Shkvarikov «Ocherk istorii planirovki i zastroyki russkikh gorodov» Gosudarstvennoye izdatel'-stvo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture; Moskva, 1954 g.
11. V.P. Zagorovskiy. Voronezh: istoricheskaya khronika. Voronezh. Tsentr.-Chernozemnoye izd. 1989. Rezhim dostupa: <http://www.vrn-histpage.ru/page.php?Page=64>
12. Troitskiy N., Troitskiy B. Sady i parki starogo Voronezha // Istoki. - Voronezh, Tsentr.-Chernozemnoye kn. izd-vo, 1981.
13. Grosheva T.I., Yenin A.Ye. Petrovskiy skver - element sistemy rekreatsii goroda Voronezha (istoriya i sovremenost')// Arkhitekturnyye issledovaniya: nauchnyy zhurnal №4(4) 2015 g. S. 79-88
14. Yenin A.Ye., Grosheva T.I. Retrospektivnyy analiz formirovaniya landshaftno-rekreatsionnykh zon goroda Voronezha// Arkhitekturnyye issledovaniya: nauchnyy zhurnal №1(1) iyun' 2015 g. S.74-80
15. T.B. Adon'yeva, Ye.M. Ivanova, L.A. Kalyuzhnaya Zelenyye nasazhdeniya goroda Voronezha: sovremennoye sostoyaniye, problemy // Nauchnyy zhurnal VESTNIK VGU Seriya: Geografiya. Geoekologiya №1, 2001 g. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/geograph/2001/01/adoniyeva.pdf>
16. Malanicheva Nadezhda Antonovna Zdorov'ye naseleniya krupnogo goroda // Problemy razvitiya terri-torii. 2012. №1. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/zdorovie-naseleniya-krupnogo-goroda>
17. Vasilenko, N. A. Sistemnyye printsipy formirovaniya landshaftno-rekrea-tsionnoy sredy krupnogo goroda: avtoref. dis. ... kand. arkitektury: 18.00.01: zashchishchena 26.11.09 / N. A. Vasilenko. — M.: Mosk. arkh. in-t, 2009. — 26 s.

#### A.E. Enin

Voronezh State Technical University, Voronezh

Candidate of Architecture, Prof., Advisor of RAACS, Head of the Basics of Design and Architectural Graphics Department

E-mail: [a\\_yenin@mail.ru](mailto:a_yenin@mail.ru)

#### T.I. Grosheva

Voronezh State Technical University, Voronezh

Assistant of the Basics of Design and Architectural Graphics Department

E-mail: [tfs007@mail.ru](mailto:tfs007@mail.ru)

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 658.26:696

СУЛТАНГУЗИН И.А., ШЮТЦ У., КАЛЯКИН И.Д., ГОВОРИН А.В., ЯВОРОВСКИЙ Ю.В.,  
ЖИГУЛИНА Е.В., ХРОМЧЕНКОВ В.Г., МАЛАХОВА А., ЛАНЦКЕ Б., ДАМЕН А.

## РАСЧЁТ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ОБСЛЕДОВАНИЕ ФАСАДА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДОМА

*В статье представлены результаты предварительного анализ расхода тепловой энергии на отопление зданий в соответствии с нормами, разработанными в Германии и России, названы причины расхождения этих норм в обеих странах. Проанализированы требования к теплопотерям зданий в соответствии с нормативами пассивного дома. В качестве объекта исследования выбран дом площадью 160 м<sup>2</sup>, расположенный в Московской области. Представлены результаты расчета теплоизоляции энергоэффективного дома с помощью пакета проектирования пассивных домов PHPP и designPH. Даны основные строительные решения по фасаду и его теплоизоляции, по энергосберегающим окнам, по утеплению потолка и крыши здания в соответствии с расчетами теплопотерь, реализованные при строительстве. Представлены результаты энергетического обследования тепловой оболочки здания с помощью тепловизора.*

**Ключевые слова:** энергоэффективный дом, теплоизоляция здания, энергетическое обследование, пассивный дом.

### Методы определения теплопотерь зданий в России и Германии

Общие требования к теплоизоляции зданий в России содержатся в [1]. В них заданы базовые значения требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций  $R$  для различных регионов строительства. Например, для стен здания, строящегося в Москве,  $R_{ст} = 3,13 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ . Аналогично определяются значения нормативного сопротивления теплопередаче для крыши, подвала и окон при строительстве зданий в различных регионах [1-3].

Требования к теплоизоляции отапливаемых зданий, а также к технике, используемой для отопления и горячего водоснабжения в Германии, регламентируются требованиями немецкого законодательства об энергосбережении (EnergieEinsparVerordnung - EnEV) [4]. Этот закон, вступивший в силу с 2002 года, претерпел изменения в 2004, 2007, 2009 и 2014 годах он был дополнен обязательными для исполнения требованиями к энергетическому паспорту здания. А с 2020 года все новые здания должны удовлетворять стандарту энергопотребления, близкого к нулевому. Также в соответствии с законодательством об использовании возобновляемых источников энергии EEWarmeG 2009 года, является обязательным их применение для производства тепловой энергии.

Для зданий с низким энергопотреблением в соответствии с EnEV2014 расход тепловой энергии должен быть на уровне  $50 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$  [4]. В соответствии с нормами пассивного дома этот показатель не должен превышать  $15 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$  [4].

Российские нормативы [1] несколько отстают от нормативов Германии в соответствии с табл.1, где представлены значения коэффициентов теплопередачи  $U$ , сопротивления теплопередаче  $R_{ст}$  и условной толщины стен при коэффициенте теплопроводности  $0,04 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{K})$ .

Таблица 1 - значения коэффициентов теплопередачи  $U$

Здания, удовлетворяющие требованиям	$U$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·K)	$R_{ст}$ , (м <sup>2</sup> ·K)/Вт	Толщина стен, см
Старые здания	1,4	0,71	3
EnEV 2002	0,45	2,24	9
EnEV 2009	0,28	3,57	14
EnEV 2014	0,21	4,76	19
Пассивный дом	0,10	10,0	40

С одной стороны в России более суровый климат, чем в Германии, что требует более существенного утепления зданий для снижения теплопотерь. С другой стороны цены на энергоносители в России существенно ниже, чем в Германии, что приводит к увеличению срока окупаемости дополнительного утепления зданий [2,3]. В условиях неопределенности исходной информации о перспективах изменения мировых цен на энергоносители и строительные материалы, невозможно однозначно предсказать, какая должна быть теплоизоляция на здания в различных регионах России при их строительстве в течение XXI века.

В данной работе рассматриваются вопросы расчета, строительства и обследования фасада энергоэффективного дома площадью 160 м<sup>2</sup>, расположенного в Московской области.

### Расчет энергоэффективного дома с помощью PHPP и DESIGNPH

На сегодняшний день в мире активно развивается строительство энергоэффективных домов. Существует множество концепций для их построения: пассивный дом, активный дом, дом с нулевым энергопотреблением [5-7] и т.д. Самый высокий стандарт для таких зданий – пассивный дом, который был разработан Вольфгангом Файстом в Германии в 1988 году [5,8]. Основные критерии пассивного дома:

- удельный расход тепловой энергии на отопление  $\leq 15 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ ,
- кратность воздухообмена при разности давлений 50 Па наружного и внутреннего воздуха  $n_{50} \leq 0,6 \text{ 1/час}$ .
- общий расход первичной энергии  $\leq 120 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ ,
- удельная отопительная нагрузка  $\leq 10 \text{ Вт}/\text{м}^2$  [5].

В России пока нет объектов, которые по всем критериям удовлетворяли бы стандарту пассивного дома, но в некоторых новых зданиях уже используются принципы, компоненты, расчетные методики пассивного дома. Для России осуществимой задачей является разработка системы энергоснабжения зданий с применением концепций пассивного и активного дома для достижения нулевого энергопотребления, то есть максимальное снижение потребления и увеличение генерации с помощью возобновляемых источников энергии (ВИЭ), которые являются неотъемлемой частью энергосистемы здания.

Расчет энергоэффективных домов с помощью пакетов планирования пассивного дома PHPP и designPH позволяет не просто рассчитать энергобаланс здания, но и учесть геометрические характеристики объекта, подобрать оптимальную толщину теплоизоляции, выявить и устранить тепловые мосты.

Актуальность разработки систем энергоснабжения зданий с минимальным энергопотреблением обусловлена тем, что для большей части территории России требуются автономные энергосистемы. Сейчас эта проблема решается завозом топлива в эти отдалённые места (Сибирь, Якутия и т.д.). Так как имеются разные климатические зоны, то важно иметь эффективный инструмент для проектирования, чтобы учитывать особенности каждой из них. Также это позволит понизить потребление ископаемых энергетических ресурсов.

Рассматриваемый объект – жилой дом, находящийся на стадии строительства. Исходные данные: 4 жильца, 160 м<sup>2</sup> жилой площади, место нахождения – Пушкинский район Московской области.

Для определения расчётных нагрузок была построена трёхмерная математическая модель с помощью программы designPH (рис. 1) [9], учитывающая геометрические характеристики объекта, ориентацию по отношению к сторонам света.

Далее уточнялись свойства теплоизоляции: толщина слоя, коэффициент теплопроводности, коэффициент теплопередачи. Были рассчитаны тепловые потери для каждого участка теплоизоляции. Также были определены теплопритоки за счёт солнечного излучения и внутренних тепловыделений. В итоге было получено годовое потребление тепловой энергии на систему отопления и вентиляции. Аналогично были рассчитаны нагрузки на систему кондиционирования воздуха в тёплый период.

Основной источник теплоснабжения – грунтовый тепловой насос, резервный – газовый конденсационный котёл. В данном здании удалось достичь годового потребления тепловой



энергии на отопление 7736 кВт·ч/год с помощью применения современных теплоизоляционных материалов, энергоэффективных окон и системы приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией теплоты удаляемого воздуха. За счёт возобновляемых источников энергии планируется генерация большей части тепловой энергии, требуемой для системы горячего водоснабжения. Для выравнивания температурного градиента в помещении предлагается использовать технологию «тёплый пол», что так же уменьшит температуру теплоносителя по сравнению с традиционными отопительными приборами.

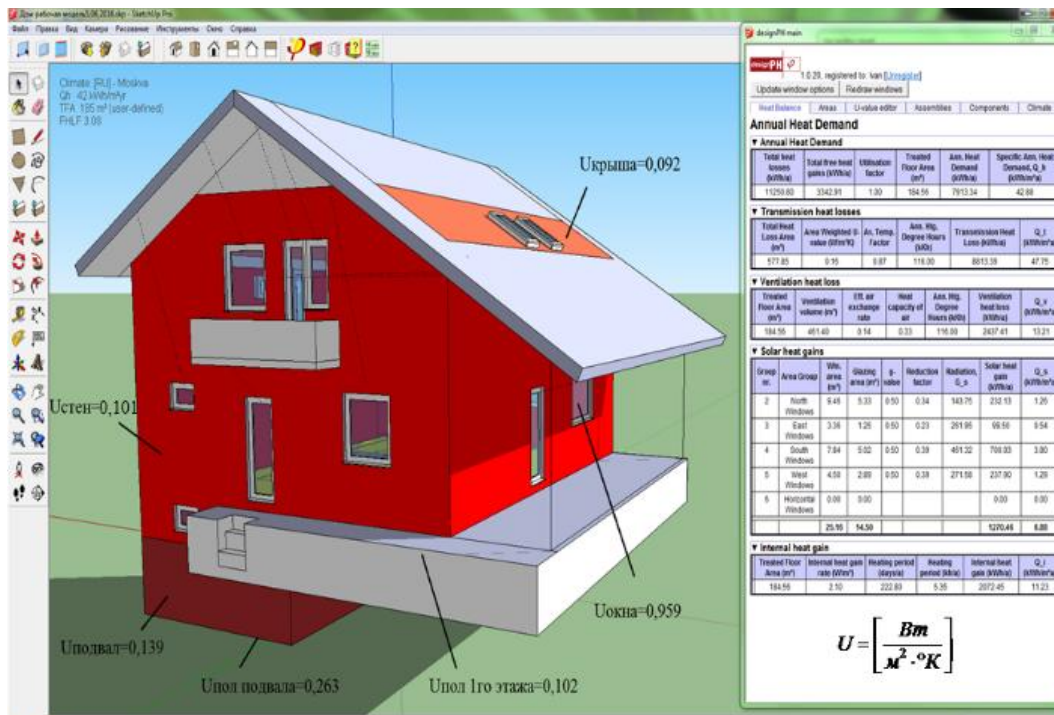


Рисунок 1 - Трёхмерная математическая модель в программе designPH

Здание расположено относительно сторон света так, чтобы можно было максимально использовать солнечную энергию для выработки электрической энергии за счёт солнечных батарей и тепловой энергии для нужд ГВС с помощью солнечных коллекторов. Для системы отопления предлагается использовать грунтовый тепловой насос, который в холодный период будет греть воду и для ГВС. Для аккумуляции электрической энергии, вырабатываемой солнечными батареями, будут использоваться аккумуляторные батареи, для аккумуляции тепловой энергии – бак-аккумулятор горячей воды. В тёплый период тепловой насос будет работать в режиме холодильной установки, покрывая нагрузки системы кондиционирования воздуха.

Для достижения нулевого энергопотребления требуется 36 солнечных панелей номинальной мощностью 320 Вт и 3 солнечных коллектора апертурой 2 м² при соответствующих характеристиках теплоизоляции.

Программа PHPP позволяет моделировать все эти составляющие системы энергоснабжения. С помощью этого инструмента проектирования можно задавать параметры оборудования и рассчитывать как потребление энергии оборудованием, так и её выработку.

В работе сравнивались 5 вариантов состава оборудования: грунтовый тепловой, воздушный тепловой насос и газовый котёл. Для воздушного теплового насоса рассматривались два источника низкопотенциальной теплоты: наружный воздух и удаляемый из помещений после рекуператора. Котёл рассматривался при отсутствии ВИЭ и рекуперации в системе вентиляции. Грунтовый тепловой насос рассматривался при 6 и при 36 солнечных панелях. Сравнение вариантов проводится по годовому энергопотреблению системой в целом и основным оборудованием. Как видно из табл. 2, самой эффективной системой является система с грунтовым тепло-



вым насосом и 36 солнечными панелями. Следует отметить, что с тепловым насосом планируется использовать вертикальные зонды. Здесь мы имеем нулевое по балансу энергопотребление системы в целом.

Таблица 2 – Сравнение вариантов по годовому энергопотреблению

	Грунтовый тепловой насос (36 солнечных батарей)	Грунтовый тепловой насос (6 солнечных батарей)	Газовый котёл	«Компактный тепловой насос» (удаляемый воздух - вода)	Воздушный тепловой насос (наружный воздух - вода)
Потребление энергии в условном топливе оборудованием, т.т./год	1,006	1,072	1,522	1,326	1,754
Потребление первичной энергии оборудованием, кВт·ч/год	7588	8089	13099	10004	13233
Удельное потребление первичной энергии системой, кВт·ч/ м <sup>2</sup> ·год	106	108	126	113	135
Удельное потребление энергии на отопление, кВт·ч/ м <sup>2</sup> ·год	39	42	46	42	41

### Строительство энергоэффективного дома

Теплоизоляция здания подбиралась на основе расчёта коэффициентов теплопередачи ограждающих конструкций в программе RHP [9]. Первоначально планировалось выполнить теплоизоляционную оболочку с толщиной слоя минеральной ваты фасада 200 мм, но после моделирования оборудования было принято решение увеличить ее толщину до 250 мм (табл. 3), чтобы расчетный коэффициент термического сопротивления стен стал равен примерно 10 м<sup>2</sup>·°C/Вт.

Таблица 3 – Подбор теплоизоляции здания

Зона	Материал	$\delta_i, м$	$\lambda_i, \frac{Вт}{м \cdot ^\circ K}$	$U_i, \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ K}$
Крыша	Древесное волокно STEICO	0,30	0,04	0,09
	Утеплитель PureOne	0,15	0,041	
Стена выше уровня земли	Газобетон	0,3	0,12	0,101
	Минеральная вата	0,25	0,036	
	Вентилируемый зазор	0,05	0,27	
	Фиброцементная плитка	0,016	0,23	
Пол первого этажа	Теплоизоляционная плита	0,1	0,037	0,102
	Бетон	0,15	2,04	
	Пенополистирол	0,2	0,029	
Пол подвала	Бетон	0,37	2,04	0,263
	Пенополистирол	0,1	0,029	
Стена подвала	Бетон	0,3	2,1	0,139
	Пенополистирол	0,2	0,029	

При увеличении толщины слоя минеральной ваты до 250 мм достигается существенное уменьшение трансмиссионных тепловых потерь, и дальнейшее уменьшение коэффициента теплопередачи для фасада не даёт значительного эффекта. Это можно наблюдать на графиках рис. 2, где представлены зависимости трансмиссионных тепловых потерь (А) и коэффициента теплопередачи (Б) от толщины слоя минеральной ваты. Теплоизоляция минеральной ватой даёт экономию энергии на отопление 6691 кВт·ч/год.

На рис.3 представлены этапы строительства фасада энергоэффективного дома.

Основным материалом наружной стены являлись газобетонные блоки DRAUBER D500 плотностью  $500 \text{ кг/м}^3$  толщиной 300 мм. На основе анализа 10 вариантов были выбраны энергоэффективные двухкамерные окна с профилем Deckeunink EFORTE 84 и стеклопакетами STIS с теплосберегающими стеклами Guardian ClimaGuard N и мультифункциональными стеклами Pilkington SunCool 70/40. В камерах толщиной 16 мм использовался аргон 90%. Коэффициент теплопередачи стеклопакетов составлял  $0,6 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$ , профиля -  $0,95 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$ .

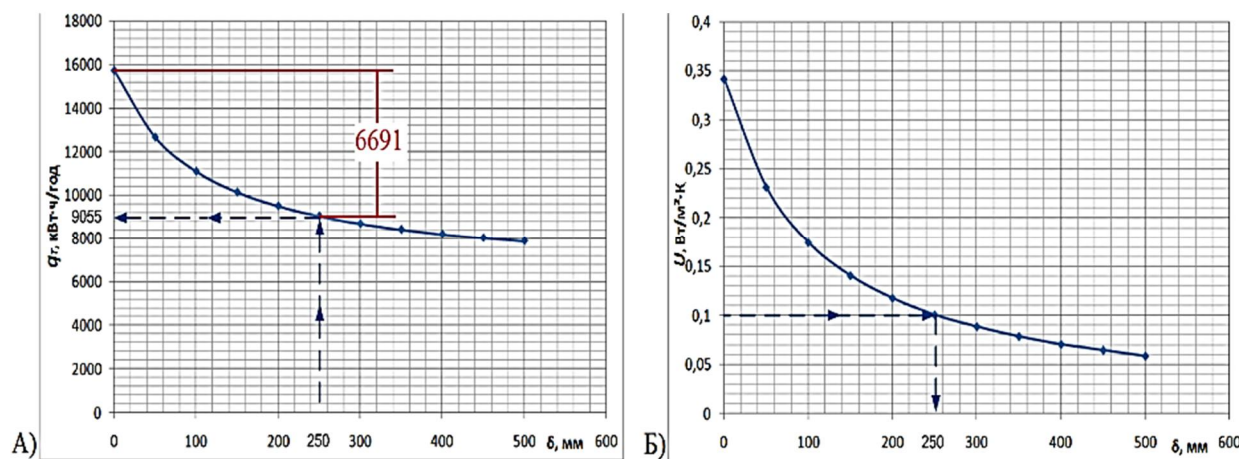


Рисунок 2 – Зависимости трансмиссионных теплотерь (А) и коэффициента теплопередачи (Б) от толщины слоя минеральной ваты



Рисунок 3 - Этапы строительства фасада энергоэффективного дома

В качестве наружной части фасада были выбраны стойкие к воздействию окружающей среды фиброцементные панели фирмы KMEW толщиной 16 и 18 мм. Для их крепления использовалась Т-образная металлическая система с кронштейнами длиной 300 мм и анкерами 160 мм.

В качестве теплоизоляции фасада использовалась минеральная вата ISOROC. Внутренний слой теплоизоляции плотностью  $50 \text{ кг/м}^3$  и толщиной 200 мм снаружи закрывался тепло-

изоляции плотностью  $80 \text{ кг/м}^3$  и толщиной 50 мм. Между теплоизоляцией и фасадом из фиброцементных панелей был воздушный вентилируемый зазор 50 мм. Теплоизоляция крепилась к газобетонной стене стеклопластиковыми дюбелями. В соответствии с рекомендациями [10] ветрозащитное покрытие было установлено на углах здания. Общая толщина теплоизоляции стен составила 618 мм с коэффициентом термического сопротивления стен  $10 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ .

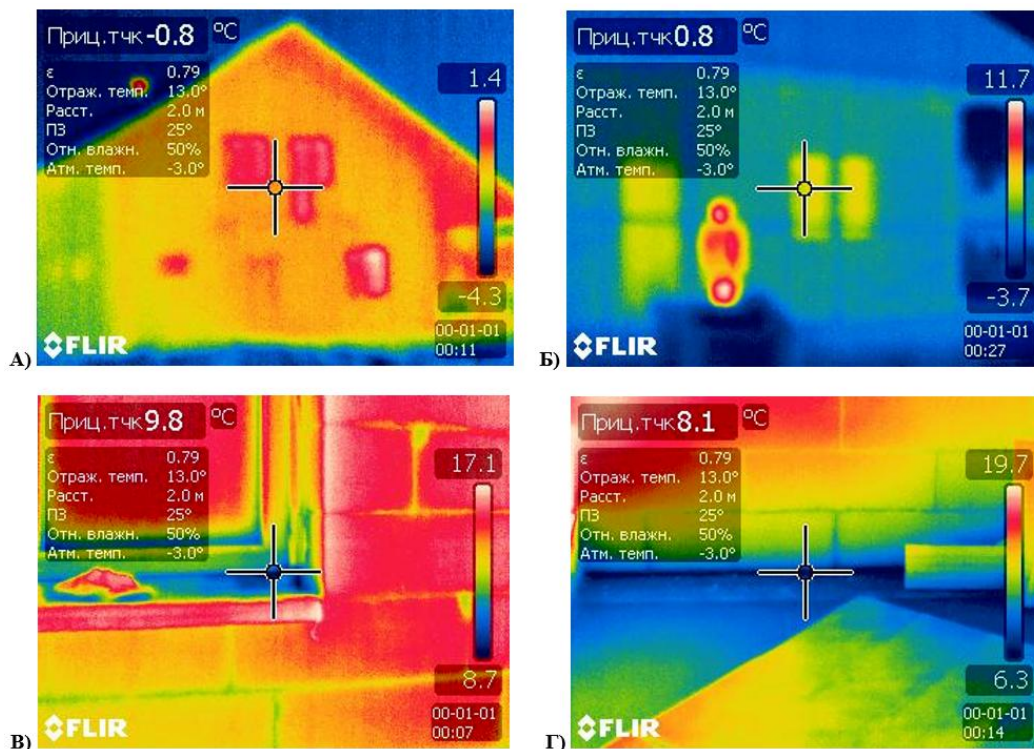


Рисунок 4 - Тепловизионная съёмка объекта

Утепление крыши осуществлялось с помощью экологичных материалов: древесного волокна STEICO zell толщиной 300 мм и кварцевого стекловолокна PureOne 37RN и 34PN (150 мм) с акриловым связующим без использования фенолов и формальдегидов.

В условиях отсутствия теплового насоса и газового котла основными источниками тепла в доме являлись печь-камин Tulikivi KTU 1010/92 на древесных брикетах с проектным КПД 91% и газовая пушка на пропане мощностью 10 кВт.

#### Энергетическое обследование энергоэффективного дома

На данный момент монтаж теплоизоляционной оболочки дома подходит к завершению. С целью выявления тепловых мостов была проведена тепловизионная съёмка объекта. Видимые тепловые потери наблюдаются на стыке некоторых оконных рам со стенами (рис. 4В), также существует тепловой мост на первом этаже на стыке фасада стен и цокольного этажа (рис. 4Г), а также на втором этаже из-за неполного покрытия мансардной части теплоизоляции крыши. На рис. 4 А и Б представлены материалы тепловизионного обследования тепловой оболочки энергоэффективного дома, проведенные в темное время суток.

В целом, тепловизионное обследование показало удовлетворительное состояние теплоизоляции фасада здания с точечными тепловыми мостами, которые в последующем будут устраняться. Рекомендации по монтажу стеклопакетов для стандарта Passive House с выдвиганием их в область изоляции не удалось выполнить в силу отсутствия необходимых приспособлений и необходимости установки окон весной, а фасада осенью. Также планируется проверка ограждающих конструкций на воздухопроницаемость для оценки герметичности теплоизоляционной оболочки и обнаружения скрытых дефектов теплового конверта здания. Воздушный зазор между минеральной ватой и фиброцементными панелями сводит к минимуму теплопередачу теплопроводностью через ограждения, при этом имеют место лучистый и конвективный



теплообмен, вследствие чего температура поверхности фасада, измеренная тепловизором, отражала лишь часть теплопотерь здания излучением. Другую - конвективную часть теплопотерь необходимо будет определить на основе измерения температуры и скорости воздуха на входе и выходе из вентиляционного зазора по всему периметру.

### Выводы

Проведенный анализ нормирования теплопотерь зданий в России и Германии показал их существенные отличия, одной из основных причин которых являются различные сроки окупаемости энергосберегающей теплоизоляции, обусловленные несоответствием уровней цен на энергоносители и материалы в обоих странах.

Пакеты планирования пассивного дома PHPP и трехмерного моделирования designPH позволяют рассчитать энергобаланс здания для последующего построения энергоэффективного дома.

Строительство фасада здания с желаемыми теплоизоляционными свойствами существенно облегчается при использовании программ PHPP и designPH в режиме последовательного расчета альтернативных вариантов, каждый раз отвечая на вопрос: «а что будет, если ... применим один теплоизоляционный материал, изменим его толщину» и т.п.

Анализ результатов расчёта системы с минимальным энергопотреблением показывает, что в суровых климатических условиях России возможно строительство энергоэффективных зданий на основе использования ВИЭ. Разработка систем энергоснабжения зданий с низким энергопотреблением – актуальная и перспективная задача.

Тепловизионное обследование показало удовлетворительное состояние теплоизоляции фасада здания с точечными тепловыми мостами, которые в последующем будут устраняться.

Необходимо проведение совместных российско-германских исследований по определению оптимальной стратегии утепления зданий в различных регионах России от Арктики до южных районов на основе прогнозирования цен на энергоносители и строительные материалы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. Свод правил СП 50.13330.2012. – М.: Министерство регионального развития РФ, 2013. – 139 с.
2. Гагарин В.Г. О нормировании теплопотерь через оболочку зданий / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 279 – 286.
3. Савин В.К. Строительная физика. Энергоэкономика. - М.: Лазурь, 2011. – 418 с.
4. Schütz W. Energy saving regulations in Germany, history – status // 3. INGENIUERTAG 2016. Der Fakultät Maschinenbau, Electro- und Energiesysteme Gus- und Osteuropatag. NESEFF-NETZWERKTREFFEN 2016. Tagungsband. Brandenburgische Technische Universität. Cottbus-Senftenberg. 14-15 November 2016. P. 167 - 173.
5. Файст В. Основные положения по проектированию пассивных домов. – М.: ООО «КОНТИ ПРИНТ», 2015. - 144 с.
6. Oliva A., Stryi-Hipp G., Kobelt S., et.al. Solar-Active-Houses – dynamic system simulations to analyze building concept with high fractions of solar thermal energy // Energy Procedia. – Vol. 70. – 2015. – P. 652 – 660.
7. Казанци О. Здание с нулевым балансом энергопотребления / О. Казанци, М. Скрупскелис, Б. Олесен, Г. Павлов // Здания высоких технологий. - 2013. – С. 24 – 35.
8. Feist W., Schnieders J., Dorer V., Haas A. Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept // Energy and Buildings. – Vol. 37. – 2005. – P. 1186 – 1203.
9. Sultanguzin I., Kalyakin I., Govorin A., Khristenko B., Yavorovsky Yu. Optimization of the energy efficient active house // 3. INGENIUERTAG 2016. Der Fakultät Maschinenbau, Electro- und Energiesysteme Gus- und Osteuropatag. NESEFF-NETZWERKTREFFEN 2016. Tagungsband. Brandenburgische Technische Universität. Cottbus-Senftenberg. 14-15 November 2016. P. 8 - 12.
10. Гагарин В.Г. Достоинства и недостатки применения ветрозащитных пленок в вентилируемых фасадах / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // СтройПРОФИль. - 2008. - № 1. - С. 29 – 33.

**Султангузин Ильдар Айдарович**

НИУ «Московский энергетический институт»,  
г. Москва

д.т.н., проф., профессор кафедры Промышленных теплоэнергетических систем

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

**Уинфрид Шютц**

Бранденбургский технический университет, г. Котбус, Германия

профессор, д.т.н. зав. каф. Строительной физики и систем энергоснабжения

E-mail: [wschuetz@b-tu.de](mailto:wschuetz@b-tu.de)

**Калякин Иван Дмитриевич**

НИУ «Московский энергетический институт»,  
г. Москва  
студент  
E-mail: [albanec1@mail.ru](mailto:albanec1@mail.ru)

**Яворовский Юрий Викторович**

НИУ «Московский энергетический институт»,  
г. Москва  
к.т.н., доцент, заведующий кафедрой Промышленных  
теплоэнергетических систем  
E-mail: [YavorovskyYV@yandex.ru](mailto:YavorovskyYV@yandex.ru)

**Жигулина Екатерина Валериевна**

НИУ «Московский энергетический институт»,  
г. Москва  
к.т.н., доцент кафедры Промышленных теплоэнергети-  
ческих систем  
E-mail: [zhigulina.kate@gmail.com](mailto:zhigulina.kate@gmail.com)

**Алиёнон Дамен**

Бранденбургский технический университет г. Котбус,  
Германия  
Научный сотрудник каф. Строительной физики и си-  
стем энергоснабжения  
E-mail: [anna.malakhova@b-tu.de](mailto:anna.malakhova@b-tu.de)

**Говорин Александр Владимирович**

НИУ «Московский энергетический институт»,  
г. Москва  
аспирант  
E-mail: [a.govorin@mail.ru](mailto:a.govorin@mail.ru)

**Хромченков Валерий Георгиевич**

НИУ «Московский энергетический институт»,  
г. Москва  
старший преподаватель кафедры Промышленных теп-  
лоэнергетических систем  
E-mail: [valeryg@list.ru](mailto:valeryg@list.ru)

**Малахова Анна**

Бранденбургский технический университет г. Котбус,  
Германия  
Научный сотрудник каф. Строительной физики и си-  
стем энергоснабжения  
E-mail: [anna.malakhova@b-tu.de](mailto:anna.malakhova@b-tu.de)

**Бьерн Ланцке**

Бранденбургский технический университет г. Котбус,  
Германия  
Научный сотрудник каф. Строительной физики и си-  
стем энергоснабжения  
E-mail: [anna.malakhova@b-tu.de](mailto:anna.malakhova@b-tu.de)

---

I. SULTANGAZIN, SCH. WINFRIED, I. KALYAKIN, A. GOVORIN, YU. YAVORIV,  
V. KHROMCHENKOV, E. ZHIGULINA, A. MALAKHOVA, A. DAMEN, B. LANZKE

## CALCULATION, CONSTRUCTION AND SURVEY OF THE FRONT OF THE ENERGY EFFICIENT HOUSE

*The article presents the results of a preliminary analysis of the heat consumption for heating of buildings in accordance with the standards developed in Germany and Russia, the reasons for the discrepancy of these rules in both countries are named. Analyzed requirements to the heat losses of buildings in accordance with passive house standards. The house with an area of 160 m<sup>2</sup>, located in the Moscow region was taken as the object of investigation. The calculation results of thermal insulation of energy-efficient building were made via the design package passive house PHPP and designPH. The main construction solutions for facade and insulation, energy efficient windows, insulation of ceiling and roof of the building are provided in accordance with the calculations of heat loss realized during the construction. The results of energy inspection of the thermal building envelope with a thermal imager are presented.*

**Keywords:** energy efficient building, building insulation, energy audit, passive house.

### BIBLIOGRAPHY

1. Teplovaya zashchita zdaniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 23-02-2003. Svod pravil SP 50.13330.2012. – M.: Ministerstvo regional'nogo razvitiya RF, 2013. – 139 s.
2. Gagarin V.G. O normirovanii teplopoter' cherez obolochku zdaniy / V.G. Gagarin, V.V. Kozlov // Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. – 2010. – № 3. – S. 279 – 286.
3. Savin V.K. Stroitel'naya fizika. Energoekonomika. – M.: Lazur', 2011. – 418 s.
4. Schütz W. Energy saving regulations in Germany, history – status – future // 3. INGENIUERTAG 2016. Der Fakultät Maschinenbau, Electro- und Energiesysteme Gus- und Osteuropatag. NESEFF-NETZWERKTREFFEN 2016. Tagungsband. Brandenburgische Technische Universität. Cottbus-Senftenberg. 14-15 November 2016. P. 167 - 173.
5. Fayst V. Osnovnyye polozheniya po proyektirovaniyu passivnykh domov. – M.: ООО «KONTI PRINT», 2015. – 144 s.
6. Oliva A., Stryi-Hipp G., Kobelt S., et.al. Solar-Active-Houses – dynamic system simulations to analyze building concept with high fractions of solar thermal energy // Energy Procedia. – Vol. 70. – 2015. – P. 652 – 660.
7. Kazantsi O. Zdaniye s nulevym balansom energopotrebleniya / O. Kazantsi, M. Skrupskelis, B. Olesen, G. Pavlov // Zdaniya vysokikh tekhnologiy. – 2013. – S. 24 – 35.

8. Feist W., Schnieders J., Dorer V., Haas A. Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept // Energy and Buildings. – Vol. 37. – 2005. – P. 1186 – 1203.
9. Sultanguzin I., Kalyakin I., Govorin A., Khristenko B., Yavorovsky Yu. Optimization of the energy efficient ac-tive house // 3. INGENIUERTAG 2016. Der Fakultat Maschinenbau, Electro- und Energiesysteme Gus- und Os-teuropatag. NESEFF-NETZWERKTREFFEN 2016. Tagungsband. Brandenburgische Technische Universitat. Cottbus-Senftenberg. 14-15 November 2016. P. 8 - 12.
10. Gagarin V.G. Dostoinstva i nedostatki primeneniya vetrozashchitnykh plenok v ventiliruyemykh fasa-dakh / V.G. Gagarin, V.V. Kozlov // StroyPROFIL'. - 2008. - № 1. - S. 29 – 33.

**I. Sultangazin**

National research UNIVERSITY "Moscow power engineering Institute", Moscow  
doctor of technical Sciences, Professor, Professor of Department of Industrial heat power system  
E-mail: [SultanguzinIA@mpei.ru](mailto:SultanguzinIA@mpei.ru)

**I. Kalyakin**

National research UNIVERSITY "Moscow power engineering Institute", Moscow  
student  
E-mail: [albanec1@mail.ru](mailto:albanec1@mail.ru)

**Yu. Yavoriv**

National research UNIVERSITY "Moscow power engineering Institute", Moscow  
Ph. D., associate Professor, head of Department of Industrial heat power system  
E-mail [YavorovskyYV@yandex.ru](mailto:YavorovskyYV@yandex.ru)

**E. Zhigulina**

National research UNIVERSITY "Moscow power engineering Institute", Moscow  
Ph. D., associate Professor of Industrial heat and power systems  
E-mail [zhigulina.kate@gmail.com](mailto:zhigulina.kate@gmail.com)

**A. Damen**

Brandenburg technical University of Cottbus, Germany  
Researcher, DEP. Building physics and energy systems  
E-mail: [anna.malakhova@b-tu.de](mailto:anna.malakhova@b-tu.de)

**Sch. Winfried**

Brandenburg technical University of Cottbus, Germany  
Professor, Ph. D. head. DEP. Building physics and energy systems  
E-mail: [wschuetz@b-tu.de](mailto:wschuetz@b-tu.de)

**A. Govorin**

National research UNIVERSITY "Moscow power engineering Institute", Moscow  
graduate student  
E-mail: [a.govorin@mail.ru](mailto:a.govorin@mail.ru)

**V. Khromchenkov**

National research UNIVERSITY "Moscow power engineering Institute", Moscow  
senior lecturer in Industrial heat and power systems  
E-mail [valeryg@list.ru](mailto:valeryg@list.ru)

**A. Malakhova**

Brandenburg technical University of Cottbus, Germany  
Researcher, DEP. Building physics and energy systems  
E-mail: [anna.malakhova@b-tu.de](mailto:anna.malakhova@b-tu.de)

**B. Lanzke**

Brandenburg technical University of Cottbus, Germany  
Researcher, DEP. Building physics and energy systems  
E-mail: [anna.malakhova@b-tu.de](mailto:anna.malakhova@b-tu.de)



УДК 624.01+614.8

ФЕДОСОВ С.В., ЛЕВАШОВ Н.Ф., АКУЛОВА М.В., ПОТЕМКИНА О.В.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

*В работе приведена концепция применения комплексной методики анализа поведения цементных композитов на основе силикатных добавок при высокотемпературном нагреве. Представлены разработанные условия проведения испытаний на базе имеющихся методов исследования неорганических строительных материалов при высокотемпературном воздействии. По результатам термогравиметрического анализа сделан вывод о том, что бетоны высокого класса имеют более прочную структуру и более высокую устойчивость при воздействии на них высоких температур, а при введении жаростойких добавок в цементные составы разрушение их структуры при нагреве сдвигается в область более высоких температур. Показан экономический эффект от внедрения предложенной методики на стадии анализа изменения физико-механических свойств при оценке строительных материалов в условиях огневого воздействия.*

**Ключевые слова:** комплексная методика, высокотемпературный нагрев, цементные композиты, силикатные добавки,

В настоящее время с целью всестороннего изучения поведения негорючих строительных материалов в условиях воздействия повышенных температур, аналогичных к условиям протекания стандартного пожара [1], продолжают активно развиваться различные подходы по выявлению процессов, происходящих в материалах строительных конструкций. На основе получаемых данных имеется возможность в той или иной мере прогнозировать поведение строительных конструкций выполненных с применением цементных композитов. На сегодняшний день такую возможность предоставляют рентгеноструктурный анализ, термический анализ неорганических соединений, испытание строительных конструкций на огнестойкость и др.

Анализ рассмотренных методик [2-6] показал, что имеющиеся подходы по определению огнестойкости и термостойкости учитывают только некоторые свойства материалов и поэтому носят односторонний характер. Проанализированные методики по анализу поведения новых разработанных материалов и их аналогов на основе цементных композитов в условиях воздействия повышенных температур не включают комплексный критерий, основанный на учете теплофизических, термохимических и физико-механических характеристик, полученных лабораторным путем, совместно с аналитическим расчетом по оценке времени наступления предельных состояний по критериям  $R, I$ , (потеря несущей способности, потеря теплоизолирующей способности). Ни один из имеющихся подходов по оценке и анализу поведения строительных материалов в условиях повышенных температур не подходит к рассмотрению данного вопроса с точки зрения комплекса мер, включающих в себя как теоретическое, так и практическое обоснование. Таким образом, возникла необходимость в разработке метода комплексного анализа поведения материалов при повышенных температурах в строительных конструкциях для полной оценки пожарной опасности строительных материалов и огнестойкости строительных конструкций. Актуальность разработки данного подхода состоит в том, что по результатам его применения впервые появляется возможность определить вероятность, вид и скорость прогрева и потери прочности строительных материалов. Комплексная методика должна увеличить точность в определении скорости разрушения и наступления предельных состояний железобетонных конструкций без применения дорогостоящих натурных испытаний по определению их пределов огнестойкости.

В данной работе предлагается комплексный подход к оценке физико-химических и физико-механических свойств. В его основу легли методы, объединяющих расчетные методы огнестойкости железобетонных конструкций, методы тонкого анализа и методы, основанные на определении теплофизических, физико-механических и термохимических характеристик. Такой подход обеспечивает полный анализ поведения бетонных и железобетонных конструкций при пожаре без натурных испытаний.

Для аналитической оценки был проведен расчет пределов огнестойкости различных цементных композитов, с использованием и подстановкой коэффициента теплопроводности, полученного экспериментальным путем [2]. Затем в рамках комплексной методики для подтверждения данных полученных аналитическим путем было проведено исследование поведения различных цементных составов, содержащих силикатные добавки, при нагреве. Определялись следующие характеристики: изменение плотности материалов, наличие и продолжительность пламенного горения, теплофизические характеристики – скорость распространения температуры в материале, коэффициент теплопроводности и коэффициент термического сопротивления на установках «ОГНМ» [7] и «ИТСМ-1» [8], определялось изменение фазовой структуры материалов на дифференциально-термическом анализаторе «Thermoscan-2» [9,10].

Дополнительно была проведена оценка изменения физико-механических характеристик составов цементных композитов до и после их нагрева при 800<sup>0</sup>С в течение часа (табл.1, рис.1, рис.1,2).

Таблица 1 -Физико-механические характеристики составов цементных композитов

№	Вид состава	Предел прочности при изгибе, МПа			Предел прочности при сжатии, МПа		
		до термо-обработки	после термообработки	% потери прочности	до термообработки	после термообработки	% потери прочности
1	Песок: вода: цемент М500 (контрольный)	1,2	1,12	6,7	9,72	9	7,4
2	Песок: вода: цемент М300: щебень (В30)	0,9	0,72	20,0	3,06	2,44	20,3
3	Песок: вода: цемент М500: щебень (В40)	1,1	1	9,1	9,04	8,13	10,06
4	Песок: вода: цемент М500: ж/стекло	1,42	1,36	4,2	19,2	17,84	7,0
5	Песок: вода: цемент М500: бой стекла	1,5	1,44	4,0	17,44	16,72	4,1
6	Песок: цемент М500: вода: шамот	0,92	0,88	4,3	12,72	12,08	5,0

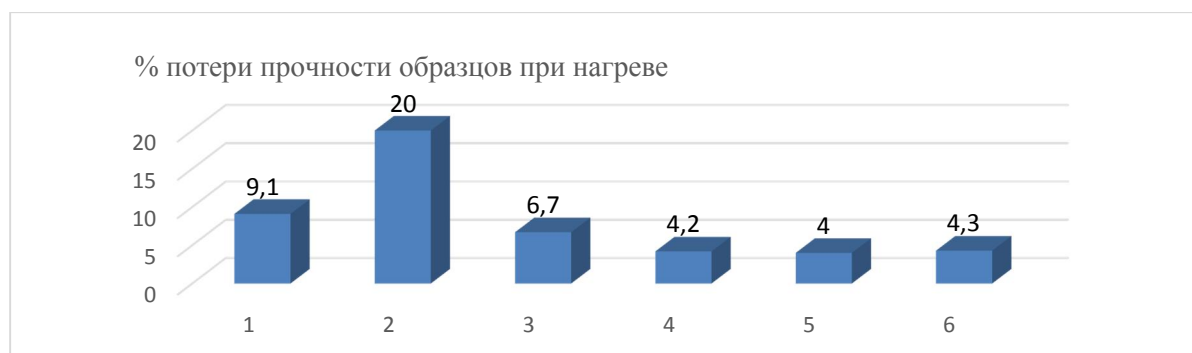
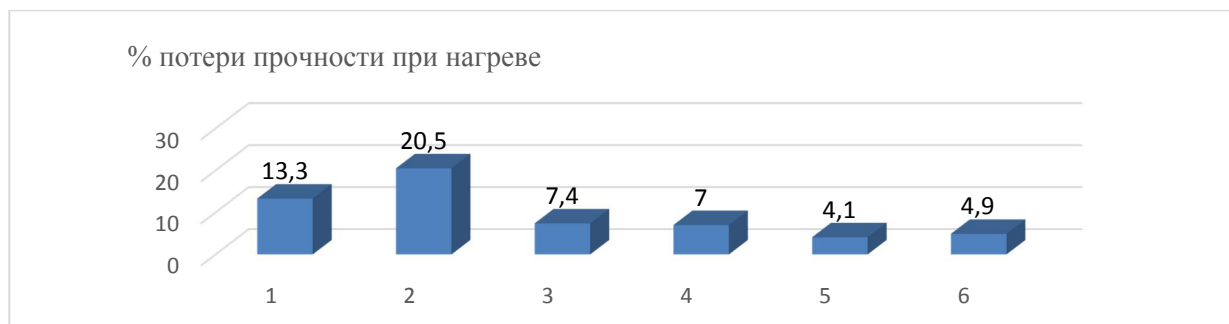


Рисунок 1 - Потери предела прочности при изгибе цементных композитов различного состава после нагрева при 800<sup>0</sup>С в течение часа: 1. песок: вода: цемент М500: щебень (В40); 2. песок: вода: цемент М300: щебень (В30); 3. песок: вода: цемент М500 (контрольный); 4. песок: вода: цемент М500: ж/стекло; 5. песок: вода: цемент М500: бой стекла; 6. песок: цемент М500: вода: шамот



**Рисунок 2 - Потери предела прочности при сжатии цементных композитов различного состава после нагрева при 800<sup>0</sup>С в течение часа: 1. песок: вода: цемент М500: щебень (В40); 2. песок: вода: цемент М300: щебень (В30); 3. песок: вода: цемент М500 (контрольный); 4. песок: вода: цемент М500: ж/стекло; 5. песок: вода: цемент М500: бой стекла; 6. песок: цемент М500: вода: шамот**

Как видно из приведенных данных, состав цементных композитов влияет на их поведение в условиях пожара и воздействия высоких температур. Физико-механические характеристики изменяются по-разному. Так предел прочности при изгибе бетонов по сравнению с песчаным раствором показывают значительное ухудшение при нагреве. Бетон класса В40 показал потерю прочности 9,1% при нагреве до 800<sup>0</sup>С, что на 25 % больше потери прочности песчано-цементного раствора. Это можно объяснить за счет уменьшения доли цементного камня в бетоне, по сравнению с раствором. При снижении класса бетона до В30, потери прочности при нагреве возрастают, и составляют 20%. Схожие результаты показывает и изменение пределов прочности при сжатии как при испытании балочек так и кубов. Можно сделать вывод, что наибольшую устойчивость при нагреве должны показывать мелкозернистые бетоны и бетоны высокого класса.

При сравнении влияния различных огнестойких добавок в цементный состав (4, 5, 6) таких как жидкое стекло, бой стекла, шамотная глина можно отметить что они увеличивают устойчивость предела прочности при изгибе при нагреве 800<sup>0</sup>С на 35-40 %.. Приведенные данные позволяют сделать вывод что наибольшую устойчивость в условиях высоких температур придают добавки боя стекла и шамотной глины.

После проведенной оценки физико-механических свойств исследовалось изменение структуры различных цементных композитов с термостойкими добавками на экспериментальной установке (SETARAM TGA 92-24), содержащие термостойкие добавки. Данная установка предназначена для проведения термогравиметрических исследований. На ней определялось изменение массы, приведенное изменение массы и изменение температуры (энергии) материала при медленном нагреве до 1000<sup>0</sup>С (DTA/DSC, TGA, TGA-DTA/DSC).

Для проведения испытаний полученные образцы цементных композитов выдерживались в естественных условиях при комнатной температуре в течение 28 суток. Затем из них изготавливались порошки и загружались в установку. Нагрев осуществлялся постепенно с шагом в 5 мин на 1 градус. В это время прибор регистрировал в виде графиков изменение массы и температуры у испытуемых образцов. Общий вид полученных данных представлен на примере результатов исследования контрольного образца №1, и образцов №2, и №3 на рис. 3-5.

На представленной термограмме можно выделить два основных температурных пика, которые соответствуют наиболее интенсивной потере массы материала. Первый пик приходится на температурный интервал 548-570<sup>0</sup>С, а второй пик, наиболее ярко выраженный, на температурный интервал 600-760<sup>0</sup>С. Поскольку в первом образце, который является контрольным, не содержится никаких дополнительных добавок (цемент М500, песок, вода), можно сделать предположение, что, исключая потерю физической влаги на первом этапе нагревания до 100-150<sup>0</sup>С, на первом выделенном температурном интервале происходит потеря химически связанной воды, так называемая дегидратация гидроксида кальция (портландита), а так же диссоциация магнезита (MgCO<sub>3</sub>) находящегося в составе цементного камня. На втором выделенном температурном интервале, который приходится на 600-760<sup>0</sup>С, наблюдается наиболее интенсивная

потеря массы, в ходе проведенного дальнейшего количественного анализа представленного в таблице №2 процент потери по массе составил 66% от общей потери в ходе всего периода нагрева. Данный факт можно объяснить тем, что на указанном интервале происходит полиморфное превращение алунита ( $4\text{Al}(\text{OH})_3$ ) и переход  $\gamma\text{-C}_2\text{S} \rightarrow \gamma'\text{C}_2\text{S}$ . Так же это можно объяснить разложением оставшейся  $\text{CaCO}_3$ .

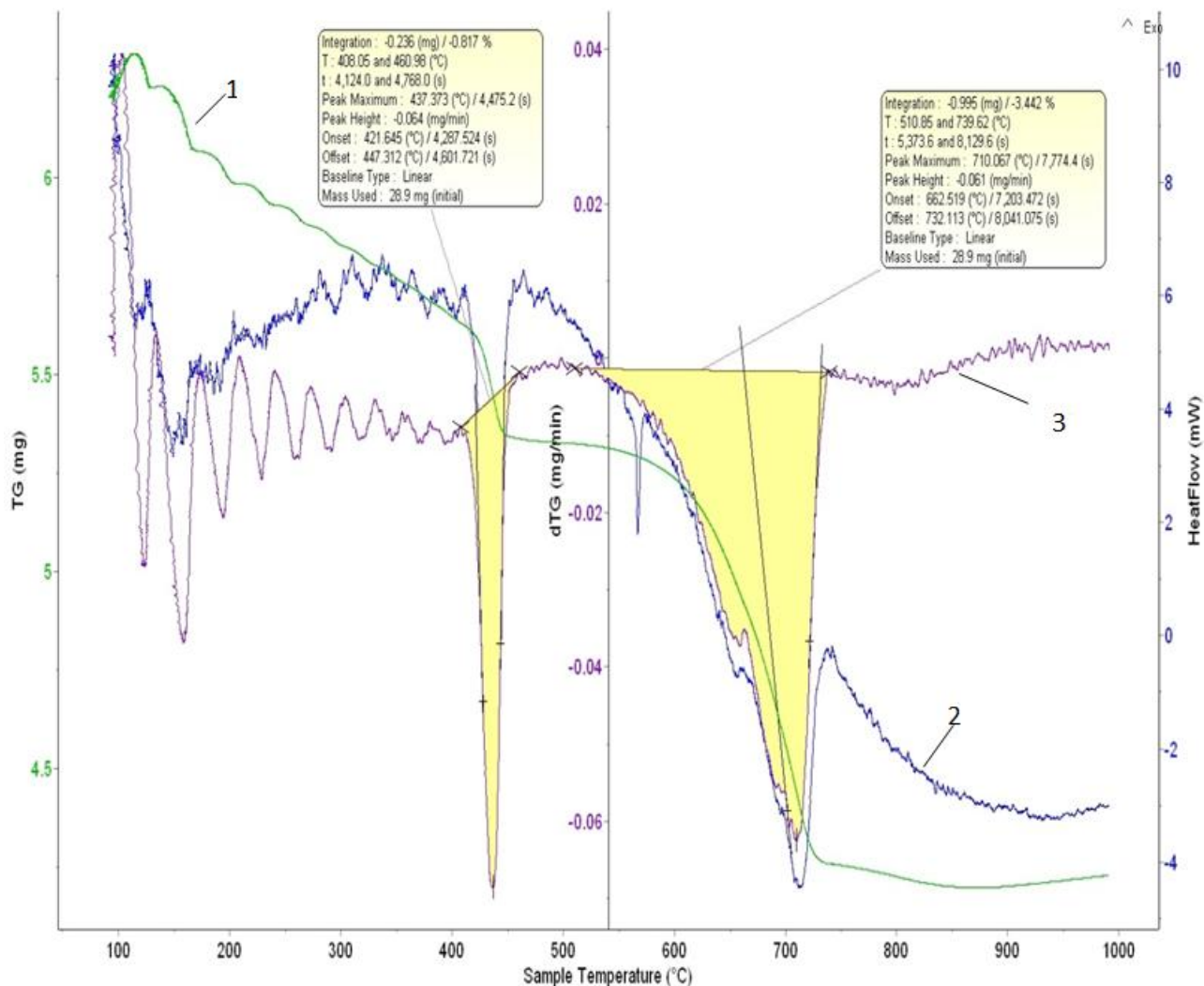


Рисунок 3 - Термогравиметрические исследования изменение массы (1), приведенное изменение массы (2) и изменение температуры (3) цементного композита состава: песок: вода: цемент М500 (контрольный)

По результатам оценки исследуемого состава №2 (песок: вода: цемент М300: щебень (В30)) так же можно выделить два основных температурных пика, которые соответствуют наиболее интенсивной потере массы. Однако первый пик, приходящийся на температурный интервал  $552\text{--}570^\circ\text{C}$  менее интенсивный относительно первого образца и по потере массы так же незначителен. Второй пик, наиболее ярко выраженный приходится на температурный интервал  $605\text{--}748^\circ\text{C}$ . Так как в составе исследуемого цементного композита №2 вместо цемента М500 содержится менее качественный цемент М300, соответственно судя по температурным интервалам, сдвинутым в сторону более низких температур разложение цементного камня, уход химически связанной воды начинается немного раньше нежели у контрольного образца. Однако на втором температурном интервале процент потери по массе составляет 33%, это почти в 2 раза меньше чем у контрольного образца на аналогичном температурном интервале, соответственно можно говорить о том, что данный образец на конкретном интервале проявил более

качественные теплоизолирующие свойства. Исходя из анализа полученных данных, можно сделать вывод о том, что данный состав цементного композита относительно контрольного образца №1 менее устойчив к высокотемпературным воздействиям, поскольку температурные интервалы, на которых происходит интенсивное разложение исследуемого образца, ближе расположены нулевой температурной отметке.

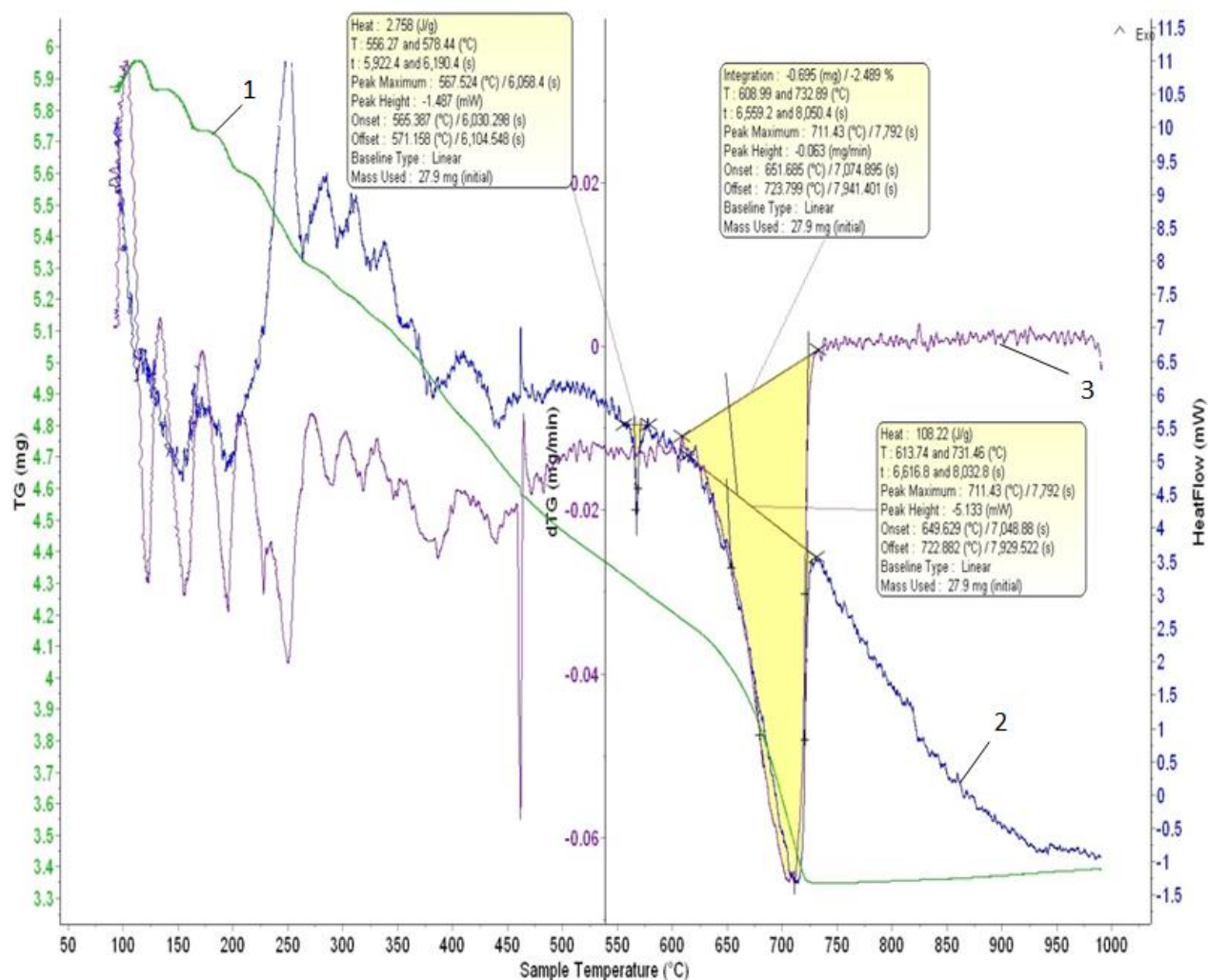


Рисунок 4 - Термогравиметрические исследования изменение массы (1), приведенное изменение массы (2) и изменение температуры (3) цементного композита состава №2 (вода: цемент М300: щебень (В30))

При оценке поведения образца цементного композита состава №3 (песок: вода: цемент М500: щебень (В40)) можно выделить два температурных пика, которые соответствующие наиболее интенсивной потере массы. Первый пик приходится на температурный интервал 402-460°C, а второй пик, наиболее ярко выраженный, на температурный интервал 460-745°C. При детальном исследовании данного образца можно заметить, что относительно первых двух образцов ширина и площадь второго температурного интервала более растянута, а первого наоборот относительно незначительна, это говорит о том, что основной процент потери массы за счет удаления химически связанной воды, а так же декарбонизации, дегидратации перекристаллизации и иных полиморфных превращений приходится именно на тот температурный промежуток, который включает в себя все основные физико-химические процессы, связанные с распадом цементного камня, поскольку жаростойких добавок на стадии затворения в данном составе не применялось.



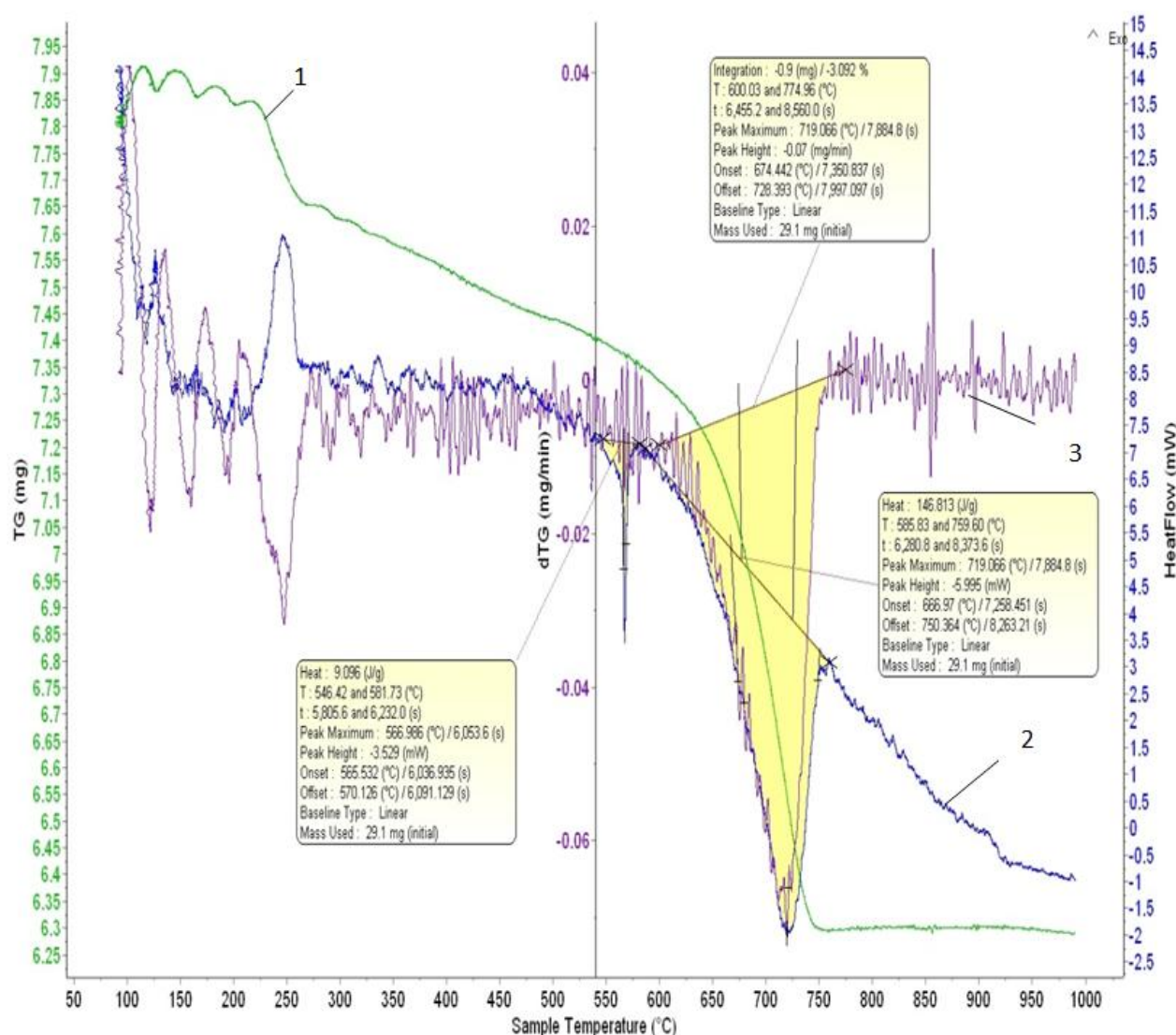


Рисунок 5 - Термогравиметрические исследования изменение массы (1), приведенное изменение массы (2) и изменение температуры (3) цементного композита состава №3 (песок: вода: цемент M500: щебень (B40))

Количественный и качественный анализ полученных (табл. 2) показал, что цементные композиты разного состава при высокотемпературном нагреве теряют свою массу и разрушаются. Эти данные хорошо коррелируются с исследованиями физико-механических характеристик данных составов. На термограммах показаны пики подтверждающие удаление физически связанной воды, изменение кристаллической структуры заполнителей, разложение гашеной извести и минералов цементного камня. Сравнивая вышеприведенные результаты можно сказать, что бетоны с более низким классом прочности при нагреве разлагаются более интенсивно теряя кристаллическую воду. При 700-800 °C потеря массы составляет до 45%.

Сравнивая образцы цементных составов под №4,5,6 можно сказать, что жаростойкие добавки влияют на структуру цементного композита и её устойчивость к нагреву. Добавка жидкого стекла снижает потерю массы при 700-750 °C с 33 % до 25 %. Добавка боя стекла снижает потерю массы до 23%, а добавка шамота до 21%. Причем дальнейшее снижение массы образцов сдвигается в область более высоких температур- 1000 °C.



Таблица 2 - Изменение массы и энергии исследуемых образцов при проведении ТГ, ДТГ испытаний

Вид образцов	Температурный интервал / температурный пик, (Т <sub>1</sub> °C-Т <sub>2</sub> °C)/ Т <sub>3</sub> °C		Общая потеря массы, относительно исходной массы образца до начала прогрева, %
	Изменение массы образца на температурном интервале относительно общей массы потерянной в ходе прогрева, %		
	Изменение энергии, (эндотермический/экзотермический эффект)		
1	2	3	4
1)	548-570/565	600-760/720	5
	2	66	
	ЭНД	ЭНД	
2)	552-570/560	605-748/705	9
	2,6	36	
	ЭНД	ЭНД	
3)	402-460/430	460-745/705	7
	19	52	
	ЭНД	ЭНД	
4)	400-470/430	548-750/704	4,9
	15	55	
	ЭНД	ЭНД	
5)	398-454/430	570-754/708	6,5
	13	41	
	ЭНД	ЭНД	
6)	395-450/425	546-743/699	5,2
	10	39	
	ЭНД	ЭНД	

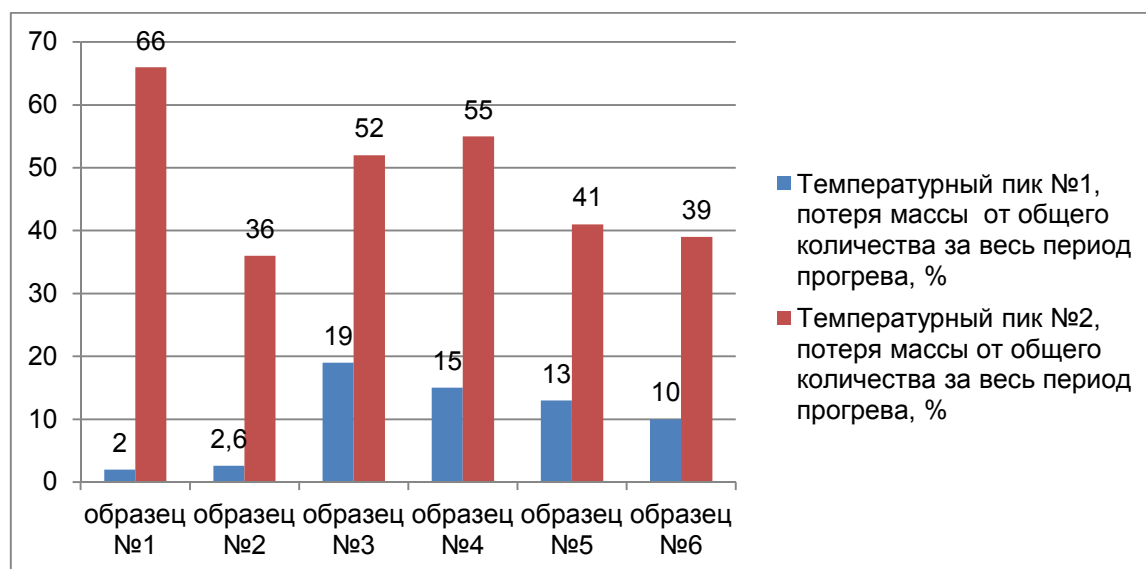


Рисунок 6 - Зависимость изменения массы исследуемых образцов при проведении ТГ, ДТГ испытаний на температурных интервалах от 500 до 800°С

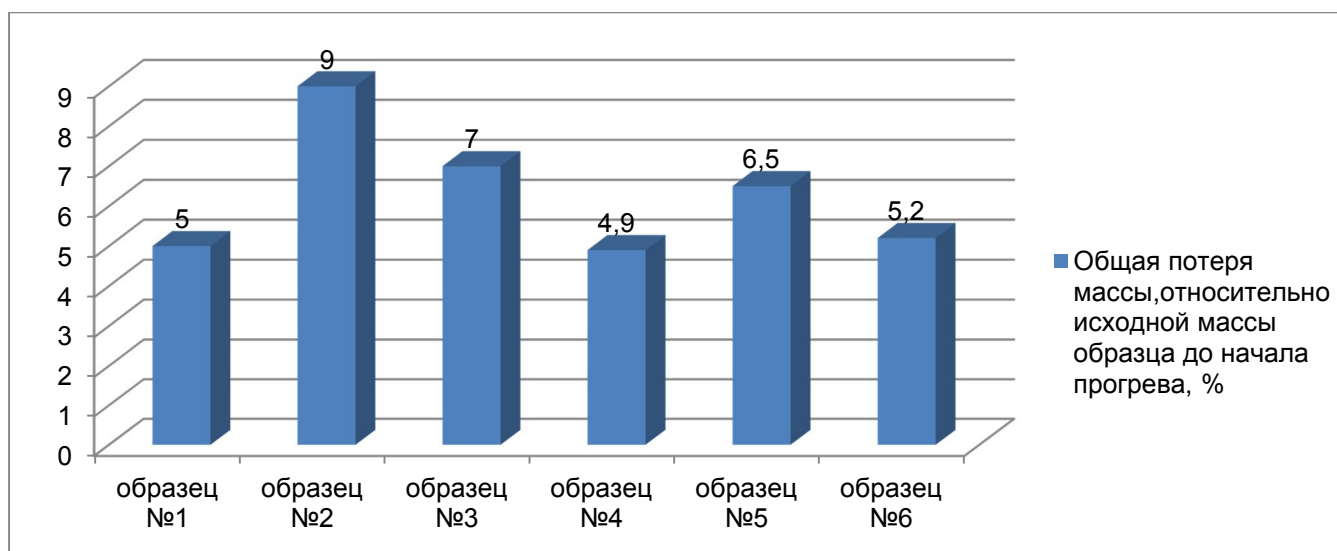


Рисунок 7 - Зависимость изменения массы исследуемых образцов при проведении ТГ, ДТГ испытаний

По результатам термогравиметрического анализа можно сделать вывод, что бетоны высокого класса имеют более прочную структуру и более высокую устойчивость при воздействии на них высоких температур. Жаростойкие добавки в цементные составы сдвигают разрушение их структуры при нагреве в область более высоких температур.

В работе так же была проведена оценка экономической эффективности использования разработанной комплексной методики в сравнении с существующей экспериментальной методикой оценки огнестойкости строительных конструкций по критериям REI (предельные состояния по потере несущей способности, по потере целостности, по потере теплоизолирующей способности) по результатам которой установлено, что сокращение текущих затрат в расчёте на одно испытание составит 40 354 руб., затраты заказчика сокращаются на 10% за счёт значительного удешевления стоимости изготавливаемых образцов и сокращения транспортных расходов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 30247.0—94. Конструкции строительные. Методы испытания на огнестойкость. Общие требования. Введ. - 01.01.1996 г. - М. : Изд-во стандартов, 1996.
2. Левашов Н.Ф., Акулова М.В., Потёмкина О.В.. Применение методики расчета огнестойкости строительных конструкций для анализа влияния силикатных добавок в растворах на свойства защитного слоя арматуры // Пожаровзрывобезопасность. - 2015. - Т.24, №. 10. - С. 30–34.
3. Król Paweł A. Evaluation of the fire resistance of steel-beam floors. Bezpieczeństwo i technika pożarnicza., 2014, vol. 35, pp. doi:73–96. 10.12845/bitp.35.3.2014.7
4. Fike R.S., Kodur V.K.R. An approach for evaluating the fire resistance of CFHSS columns under design fire scenarios. Journal of Fire Protection Engineering., 2009, vol. 4, pp. 229–259. doi: 10.1177/1042391509105597.
5. Peng G. Evaluation of fire damage to high-performance concrete. Dis. Ph.D. Hong Kong Polytechnic Institute. Hong Kong. 2000.
6. Молчадский О.И. Прогноз пожарной опасности строительных материалов при использовании методов термического анализа. Дис. канд. тех. наук. Москва, 2001. 209 с.
7. ГОСТ 12.1.044-89. «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения». п.4. 1 Метод экспериментального определения группы негорючих материалов. - Введ. 01.01.1991 г. - М. : Изд-во стандартов, 1989.
8. ГОСТ 7076-99. «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». - Введ. 01.04.2000 г. - М. : Изд-во стандартов, 1999.
9. Левашов Н. Ф., Акулова М. В., Потёмкина О. В., «Использование термогравиметрического метода анализа для исследования влияния вида заполнителя на свойства пенобетона»././Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация - 2015. Вып.№4. С.75-78.
10. Федосов С. В., Левашов Н. Ф., Акулова М. В., Потёмкина О. В., Животыгина С.Н. «Применение комплексной методики анализа поведения цементных композитов с силикатными добавками; при повышенных температурах» // Пожаровзрывобезопасность. - 2016. - Т.25, №. 10. - С. 14–21.

**Федосов Сергей Викторович**

Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново

Доктор технических наук, профессор, академик РААСН, заведующий кафедрой техносферной безопасности

E-mail: [prezident@ivgpu.com](mailto:prezident@ivgpu.com)

**Левашов Никита Фёдорович**

98 гвардейская воздушно-десантная дивизия МО РФ

Начальник службы КЭС в/ч 65451

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

**Акулова Марина Владимировна,**

Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново

Доктор технических наук, профессор, советник РААСН, заведующая кафедрой строительного материаловедения, специальных технологий и технологических комплексов

E-mail: [m\\_akulova@mail.ru](mailto:m_akulova@mail.ru)

**Потемкина Ольга Владимировна**

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Иваново

Кандидат химических наук, доцент, заместитель начальника академии по учебной работе

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

---

S.V. FEDOSOV, N.F. LEVASHOV, M.V. AKULOVA, O.V. POTEKINA

## PROSPECTS OF APPLICATION OF INTEGRATED METHOD OF ANALYSIS OF BEHAVIOR OF CEMENT COMPOSITES IN CONDITIONS OF INFLUENCE OF HEIGHTED TEMPERATURE

*The paper presents the concept of applying a complex methodology for analyzing the behavior of cement composites, based on silicate additives, with high-temperature heating. There are presented conditions for testing on the basis of existing methods for studying inorganic building materials under high-temperature influence. Based on the results of thermogravimetric analysis, it was concluded that high-grade concrete has a stronger structure and higher stability when high temperatures are produced. Heat-resistant additives are added to cement compositions, the breakdown of their structure upon heating shifts to a region of higher temperatures -red. The economic effect is shown of the introduction of the proposed method at the stage of analysis of the change in physical and mechanical properties in the evaluation of building materials under high-temperature influence.*

**Key words:** complex methodology, the high-temperature heat, cement composites, silicate additives.

### BIBLIOGRAPHY

1. GOST 30247.0—94. Konstruktsii stroitel'nyye. Metody ispytaniya na ognestoykost'. Obshchiye trebovaniya. Vved. - 01.01.1996 g. – М. : Izd-vo standartov, 1996.
2. Levashov N.F., Akulova M.V., Potemkina O.V.. Primeneniye metodiki rascheta ognestoykosti stroi-tel'nykh konstruktsiy dlya analiza vliyaniya silikatnykh dobavok v rastvorakh na svoystva zashchitnogo sloya armatury // Pozharovzryvobezopasnost'. – 2015. – Т.24, №. 10. – S. 30–34.
3. Król Paweł A. Evaluation of the fire resistance of steel-beam floors. Bezpieczenstwo i technika pozar-nicza., 2014, vol. 35, pp. doi:73–96. 10.12845/bitp.35.3.2014.7
4. Fike R.S., Kodur V.K.R. An approach for evaluating the fire resistance of CFHSS columns under design fire scenarios. Journal of Fire Protection Engineering., 2009, vol. 4, pp. 229–259. doi: 10.1177/1042391509105597.
5. Peng G. Evaluation of fire damage to high-performance concrete. Dis. Ph.D. Hong Kong Polytechnic Insti-tute. Hong Kong. 2000.
6. Molchadskiy O.I. Prognoz pozharnoy opasnosti stroitel'nykh materialov pri ispol'zovanii meto-dov termicheskogo analiza. Dis. kand. tekhn. nauk. Moskva, 2001. 209 s.
7. GOST 12.1.044-89. «Pozharovzryvopasnost' veshchestv i materialov. Nomenklatura pokazateley i metody ikh opredeleniya». p.4. 1 Metod eksperimental'nogo opredeleniya gruppy negoryuchikh materialov. – Vved. 01.01.1991 g. – М. : Izd-vo standartov, 1989.

8. GOST 7076-99. «Materialy i izdeliya stroitel'nyye. Metod opredeleniya teploprovodnosti i ter-micheskogo so-protivleniya pri statsionarnom teplovom rezhime». – Vved. 01.04.2000 g. – M. : Izd-vo standartov, 1999.
9. Levashov N. F., Akulova M. V., Potomkina O. V., «Ispol'zovaniye termogravimetricheskogo metoda analiza dlya issledovaniya vliyaniya vida zapolnitelya na svoystva penobetona» // Pozhary i chrezvychaynyye situa-tsii: predot-vrashcheniye, likvidatsiya - 2015. Vyp. №4. С. 75-78.
10. Fedosov S. V., Levashov N. F., Akulova M. V., Potomkina O. V., Zhivotyagina S.N. «Primeneniye kom-pleksnoy metodiki analiza povedeniya tsementnykh kompozitov s silikatnymi dobavkami, pri povyshennykh tempera-turakh» // Pozharovzryvobezopasnost'. – 2016. – Т. 25, №. 10. – С. 14–21

**S.V. Fedosov**

Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo

Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAACS, Head of the Department of Technospheric Security

E-mail: [prezident@ivgpu.com](mailto:prezident@ivgpu.com)

**N.F. Levashov**

98 Guards Airborne Division of the Ministry of Defense of the Russian Federation

Head of IES military service 65451

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

**M.V. Akulova**

Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo

Doctor of Technical Sciences, Professor, Advisor of RAACS, Head of the Department of Building Materials, Special Tech-nologies and Technological Complexes

E-mail: [m\\_akulova@mail.ru](mailto:m_akulova@mail.ru)

**O.V. Potemkina**

Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Measures of Russia, Ivanovo

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Academy for Academic Affairs

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

УДК: 666.972.16:691.327

ЩЕПОЧКИНА Ю.А., БЫКОВ И.А.

## МОДИФИКАЦИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА ДОБАВКАМИ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ПЛАСТМАССЫ

*Мелкозернистый бетон – один из востребованных материалов в современном строительстве. Свойства мелкозернистого бетона определяются теми же факторами что и у бетона на крупном заполнителе, но имеется ряд особенностей: увеличенный расход цемента, большая однородность, повышенная пористость, низкая прочность при изгибе, растяжении и ударных нагрузках. Определенный интерес с точки зрения улучшения потребительских свойств мелкозернистого бетона, представляет его модифицирование добавками полимерных материалов, в том числе добавками измельченной пластмассы.*

*Проведена оценка возможностей использования в составе мелкозернистого бетона пластмассовых отходов в виде поливинилхлоридной стружки, образующейся в значительных количествах при производстве пластиковых окон, а также измельченных обрезков пластмассовых труб.*

*Проведенные исследования подтверждают, что модификация мелкозернистого бетона пластмассовыми отходами в виде поливинилхлоридной стружки или колец из обрезков пластмассовых труб в количестве 0,5-2 мас % приводит к повышению его прочности на изгиб и сжатие. При этом введение стружки в указанных пределах способствует незначительному снижению плотности мелкозернистого бетона, а введение колец не оказывает существенного влияния на этот показатель.*

**Ключевые слова:** мелкозернистый бетон, пластмасса, модификация

Мелкозернистый бетон в настоящее время является одним из основных конструкционных материалов в строительстве. Свойства мелкозернистого бетона определяются теми же факторами что и у бетона на крупном заполнителе, но имеется ряд особенностей: увеличенный расход цемента, большая однородность, повышенная пористость, низкая прочность при изгибе, растяжении и ударных нагрузках. На протяжении многих лет активно используются многокомпонентные мелкозернистые бетоны [1-4]. Определенный интерес с точки зрения улучшения потребительских свойств мелкозернистого бетона, представляет его модифицирование добавками полимерных материалов. В последние годы в России и за рубежом появились мелкозернистые бетоны, модифицированные добавками измельченной пластмассы [5-10]. Ежегодно в мире накапливается до 20 млн.т отходов пластмасс, из них 15-30 % подвергается дальнейшей переработке, 20-40 % сжигается, а остальные 35-70 % складываются на полигонах, свалках или закапываются в землю [11]. Использование пластмассовых отходов при изготовлении строительных материалов может способствовать частичному решению сложившейся проблемы.

Целью данного исследования была оценка возможностей использования в составе мелкозернистого бетона пластмассовых отходов в виде поливинилхлоридной стружки, образующейся в значительных количествах при производстве пластиковых окон, а также измельченных обрезков водопроводных поливинилхлоридных труб.

Стружка (рис.1) длиной 10-15 мм, шириной 3-4 мм и толщиной 0,2 мм на мелких предприятиях-изготовителях пластиковых окон практически не утилизируется. Никакой дополнительной подготовки перед введением в бетонную смесь этот компонент не требует.

Обрезки поливинилхлоридных труб образуются в результате монтажа, ремонта, замены участков водопроводных сетей, преимущественно, в жилых и общественных зданиях. Большое количество таких отходов – это обрезки труб с наружным диаметром 22 мм и толщиной стенки 4 мм. Перед введением в бетонную смесь обрезки труб нарезают кольцами (рис.2) толщиной 3-4 мм.



*Рисунок 1 – Стружка, образующаяся при производстве пластиковых окон*



*Рисунок 2 – Нарезанные кольцами обрезки поливинилхлоридных труб*

Составы бетонных смесей с включением измельченной пластмассы приведены в таблицах 1 и 2. Из приготовленных бетонных смесей (осадка конуса 1-2 см) были изготовлены стандартные образцы-балочки размером 160×40×40 мм. Исследование свойств мелкозернистого бетона проводилось на 134 образцах в возрасте 28 сут.

Таблица 1 – Составы бетонной смеси с включением стружки

Компоненты	Содержание , мас %						
	1	2	3	4	5	6	7
Портландцемент М 500	25	25	25	25	25	25	25
Кварцевый песок	75	74,5	74	73	72	71	70
Стружка	-	0,5	1	2	3	4	5
Водоцементное отношение	0,5						
Прочность бетона на изгиб, МПа	2,4	1,23	3	2	1,53	1,7	1,93
Прочность бетона на сжатие, МПа	21,58	25,42	37,5	28,25	19,92	15,42	19,53

Таблица 2 – Составы бетонной смеси с включением колец из обрезков труб

Компоненты	Содержание , мас %			
	1	2	3	4
Портландцемент М 500	25	25	25	25
Кварцевый песок	75	74,5	74	73
Кольца из обрезков труб	-	0,5	1	2
Водоцементное отношение	0,5			
Прочность бетона на изгиб, МПа	2,4	2,7	2,18	1,7
Прочность бетона на сжатие, МПа	21,58	34,13	32,22	25,69

Как видно из таблиц, введение измельченной пластмассы оказывает влияние на прочность мелкозернистого бетона на сжатие и изгиб. В частности, наиболее эффективно введение в бетонную смесь стружки в количестве 1 мас.% (табл.1), а колец в количестве 0,5 мас. % (табл.2). Влияние измельченной пластмассы и на плотность мелкозернистого бетона отражено на рис. 3 и 4.



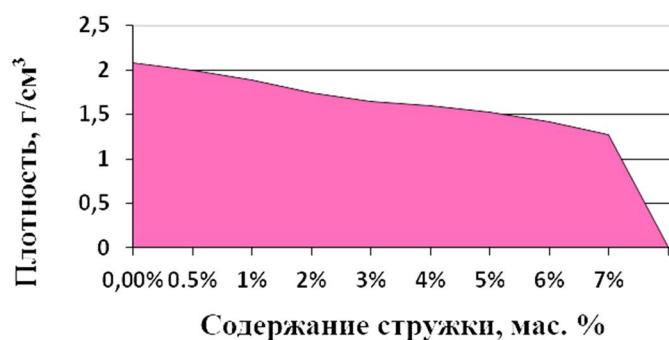


Рисунок 3 – Плотность мелкозернистого бетона с включением стружки

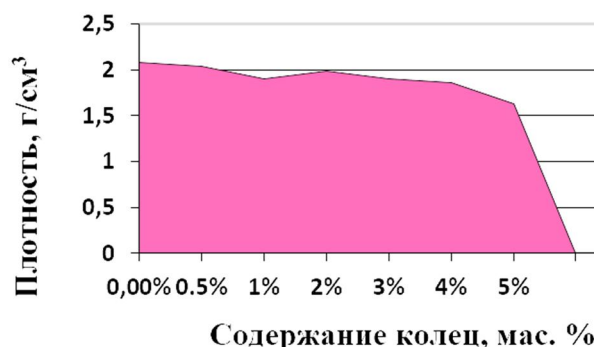


Рисунок 4 – Плотность мелкозернистого бетона с включением колец из обрезков труб

Проведенные исследования подтверждают, что модификация мелкозернистого бетона пластмассовыми отходами в виде поливинилхлоридной стружки, образующейся при производстве пластиковых окон, или колец из обрезков поливинилхлоридных труб в количестве 0,5-2 мас.% приводит к повышению его прочности на изгиб и сжатие. При этом введение стружки в указанных пределах способствует незначительному снижению плотности материала, а введение колец не оказывает существенного влияния на этот показатель.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грызлов, В.С. Информационно-физические аспекты макроструктурообразования бетона [Текст] / В.С. Грызлов, С.В. Демидов // Известия вузов. Строительство. – 2000. – № 7-8. – С. 39-42.
2. Гусев, Б.В. Цементы и бетоны – тенденции развития [Текст] / Б.В. Гусев, Ин Иен-лян С., Т.В. Кузнецова. – М.: Научный мир, 2012. – 136 с.
3. Венюа, М. Цементы и бетоны в строительстве [Текст] / М. Венюа: Пер. с фр. – М.: Стройиздат, 1980. – 415 с.
4. Лермит, Р. Проблемы технологии бетона [Текст] / Р. Лермит: Пер. с фр.; Под ред. А.Е. Десова. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 296 с.
5. Вторичные материальные ресурсы для строительной индустрии [Текст] / С.В. Федосов [и др.]. – Иваново, ИВГПУ, 2017. – 188 с.
6. Майорова, Л.С. Модифицирование мелкозернистых цементных бетонов минерально-полимерными отходами [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Л.С. Майорова – Волгоград, 2007. – 188 с.
7. Пат. № 2083523 Российская Федерация. Бетонная смесь / № 93003746; заявл. 25.01.1993; опубл. 10.07.1997, Бюл. № 19. – 3 с.
8. Пат. № 2592270 Российская Федерация Бетонная смесь / № 2015129911; заявл. 20.07.2015; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20. – 2 с.
9. Betonai su elastingu priedu: pat. № 4929 Lietuvos Respublika. № 2001068; teig. 27.06.2001; pask. 25.04.2002, Biul. № 4. – 2 p.
10. Langier, B. Modyfikacje betonu dodatkiem rozdrobnionego polipropylenu / B. Langier, K. Werner, W. Baranowski // Przetwórstwo tworzyw. – 2014. – № 4. – S. 299-304.
11. Корчагина, В.И. Анализ экологических проблем использования полимерных строительных материалов [Текст] / В.И. Корчагина, С.А. Андреева // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2010. – № 6. – С. 22-23.

### Щепочкина Юлия Алексеевна

Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново

Доктор технических наук, профессор. Кафедра “Строительное материаловедение, специальные технологии и технологические комплексы”

e-mail: [julia2004ivanovo@yandex.ru](mailto:julia2004ivanovo@yandex.ru).

### Быков Игорь Алексеевич

Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново

Аспирант. Кафедра “Строительное материаловедение, специальные технологии и технологические комплексы”

e-mail: [yakuba\\_i@mail.ru](mailto:yakuba_i@mail.ru)

J.A. SHCHEPOCHKINA, I.A. BYKOV

## MODIFICATION OF FINE-GRAINED CONCRETE ADDITIVES CRUSHED PLASTIC

*Fine concrete is one of the most demanded materials in modern construction. Properties of fine-grained concrete are defined by the same factors as that of concrete large aggregate, but there are a number of reasons: increased the consumption of cement, more homogeneity, high porosity, low Flexural strength, tensile and shock loads. Of particular interest from the point of view of improvement of consumer properties of fine-grained concrete, is it modifying additives of polymeric materials, including additives shredded plastic.*

*An assessment of the capacity of use in the fine aggregate concrete plastic waste: polyvinyl chloride chips that are formed in significant quantities in the production of plastic windows and shredded scraps of plastic pipes.*

*The studies confirm that the modification of fine-grained concrete, plastic-ment of waste in the form of polyvinyl chloride chips or rings from scraps of plastic pipes in the amount of 0,5-2 mas. % increases its bending strength and compression. The introduction of the chip set, which limits contributes to a slight decrease of density of fine-grained concrete, and the introduction of the rings has no significant effect on this parameter.*

**Keywords:** fine concrete, plastic, modification

### BIBLIOGRAPHY

1. Gryzlov, V.S. Informatsionno-fizicheskiye aspekty makrostrukturnoobrazovaniya betona [Tekst] / V.S. Gryzlov, S.V. Demidov // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. – 2000. – № 7-8. – S. 39-42.
2. Gusev, B.V. Tsementy i betony – tendentsii razvitiya [Tekst] / B.V. Gusev, In Iyen-lyan S., T.V. Kuznetsova. – M.: Nauchnyy mir, 2012. – 136 s.
3. Venyua, M. Tsementy i betony v stroitel'stve [Tekst] / M. Venyua: Per. s fr. – M.: Stroyizdat, 1980. – 415 s.
4. Lermi, R. Problemy tekhnologii betona [Tekst] / R. Lermi: Per. s fr.; Pod red. A.Ye. Desova. – M.: Izd-vo LKI, 2007. – 296 s.
5. Vtorichnyye material'nyye resursy dlya stroitel'noy industrii [Tekst] / S.V. Fedosov [i dr.]. – Iva-novo, IVGPU, 2017. – 188 s.
6. Mayorova, L.S. Modifitsirovaniye melkozernistykh tsementnykh betonov mineral'no-polimernymi otkhodami [Tekst]: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05 / L.S. Mayorova – Volgograd, 2007. – 188 s.
7. Pat. № 2083523 Rossiyskaya Federatsiya. Betonnaya smes' / № 93003746; zayavl. 25.01.1993; opubl. 10.07.1997, Byul. № 19. – 3 s.
8. Pat. № 2592270 Rossiyskaya Federatsiya Betonnaya smes' / № 2015129911; zayavl. 20.07.2015; opubl. 20.07.2016, Byul. № 20. – 2 s.
9. Betonai su elastingu priedu: pat. № 4929 Lietuvos Respublika. № 2001068; teig. 27.06.2001; pask. 25.04.2002, Biul. № 4. – 2 p.
10. Langier, B. Modyfikacje betonu dodatkiem rozdrobnionego polipropylenu / B. Langier, K. Werner, W. Baranowski // Przetwórstwo tworzyw. – 2014. – № 4. – S. 299-304.
11. Korchagina, V.I. Analiz ekologicheskikh problem ispol'zovaniya polimernykh stroitel'nykh materia-lov [Tekst] / V.I. Korchagina, S.A. Andreyeva // Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka. – 2010. – № 6. – S. 22-23..

#### J.A. Shchepochkina

Ivanovo State Polytechnical University, Ivanovo

Doctor of technical science, professor of departament “Building materials technology and special technologies”

E-mail: [julia2004ivanovo@yandex.ru](mailto:julia2004ivanovo@yandex.ru).

#### I.A. Bykov

Ivanovo State Polytechnical University, Ivanovo

Post-graduate of departament “Building materials technology and special technologies”

E-mail: [yakuba\\_i@mail.ru](mailto:yakuba_i@mail.ru)

**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 сверху – 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 прислать 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 узкопрофессионального 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 объем – не менее 100 слов;
- **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)**

---

*Адрес издателя:*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302026, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская д. 95  
+7 (4862) 777-318

[www.oreluniver.ru](http://www.oreluniver.ru)

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

*Адрес редакции*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302006, г. Орел, ул. Московская, 77.  
+7 (4862) 73-43-49

[www.build.oreluniver.ru](http://www.build.oreluniver.ru)

E-mail: [str\\_and\\_rek@mail.ru](mailto:str_and_rek@mail.ru)

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 08.08.2017 г.  
Дата выхода в свет 22.08.2017 г.  
Формат 70×108 1/16. Печ. л. 8,0.  
Цена свободная. Тираж 500 экз.  
Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической  
базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.