



Научно-технический журнал  
Издается с 2003 года.  
Выходит шесть раз в год.

**№5 (43) 2012**  
**(сентябрь-октябрь)**

# СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

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

## Редакционный совет:

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

## Главный редактор:

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

## Заместители главного редактора:

**Данилевич Д.В.** к.т.н., доц.  
**Колесникова Т.Н.** д. арх., проф.  
**Коробко В.И.** д.т.н., проф.

## Редколлегия:

**Бондаренко В.М.** акад. РААСН, д.т.н., проф.  
**Гордон В.А.** д.т.н., проф.  
**Карпенко Н.И.** акад. РААСН, д.т.н., проф.  
**Клюева Н.В.** советник РААСН, д.т.н., проф.  
**Коробко А.В.** д.т.н., проф.  
**Король Е.А.** чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.  
**Меркулов С.И.** чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.  
**Ольков Я.И.** акад. РААСН, д.т.н., проф.  
**Римшин В.И.** чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф.  
**Сергейчук О.В.** д.т.н., проф.  
**Серпик И.Н.** д.т.н., проф.  
**Тур В.В.** д.т.н., проф.  
**Турков А.В.** д.т.н., проф.  
**Федоров В.С.** акад. РААСН, д.т.н., проф.  
**Чернышов Е.М.** акад. РААСН, д.т.н., проф.  
**Шах Р.** д.т.н., проф.

## Ответственный за выпуск:

**Солопов С.В.** к.т.н.

## Адрес редакции:

302006, Россия, г. Орел,  
ул. Московская, 77  
Тел.: +7 (4862) 73-43-49  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: oantc@mail.ru

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

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

© ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2012

## Содержание

### **Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции**

- Блажнов А.А.** Способ статистического расчета мягкой кровли арочного сооружения на ветровую нагрузку..... 3
- Зейниев Г.Я., Тюрин Д.А., Агеев С.М., Лабудин Б.В.** Буронабивная свая для обеспечения устойчивости стен котлована..... 8
- Клюева Н.В., Шувалов К.А.** Экспериментальные исследования живучести предварительно напряженных железобетонных балочных систем..... 13
- Петров М.Р., Петрова А.Н.** Применение аналитических методов теории электрических цепей к расчету шарнирно-стержневых систем..... 23
- Ярыгина О.В.** Расчет надежности железобетонной балки по критерию прочности арматуры при ограниченной информации на стадии проектирования..... 29

### **Архитектура и градостроительство**

- Колчунов В.И., Брума Е.В.** Предложения по количественной оценке соответствия элементов городской среды потребностям маломобильных групп населения..... 35

### **Строительные материалы и технологии**

- Горшенин В.П.** Новый подход к решению задачи центрального регулирования совмещенной нагрузки отопления и горячего водоснабжения в водяных системах централизованного теплоснабжения.. 39
- Колпаков А.В., Абдрахимов В.З.** Исследование коэффициента вспучивания и фазового состава на различных этапах обжига керамзита из межсланцевой и бейделлитовой глины..... 50
- Ладаев Н.М., Жбанов Н.С.** Влияние вращения ротора на изменение температуры воздуха в роторной мельнице..... 59
- Лукотцова Н.П., Пыкин А.А., Устинов А.Г., Кондрик А.С.** Коррозионная стойкость бетона с добавкой углерод-кремнеземистого наномодификатора.. 62
- Огурцов В.А., Огурцов А.В., Митрофанов А.В., Алешина А.П.** Ячеечная модель псевдооживления в технологии производства строительных материалов..... 68



Scientific and technical journal  
The journal is published since 2003.  
The journal is published 6 times a year.

**№5 (43) 2012**  
**(September-October)**

# BUILDING AND RECONSTRUCTION

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

## Editorial council:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Editor-in-chief

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

## Editor-in-chief assistants:

**Danilevich D.V.** Candidat Sc. Tech., Assis-  
tant Prof.

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

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

## Editorial committee

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

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

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

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

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

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

**Merkulov C.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

**Olkov Y.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

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

**Sergeychuk O.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

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

**Tur V.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

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

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

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

**Schach R.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## Responsible for edition:

**Solopov S.V.** Candidat Sc. Tech

The edition address: 302006, Orel,

Street Moscow, 77

+7 (4862) 73-43-49

www.gu-unpk.ru

E-mail: oante@ostu.ru

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

The certificate of registration:

ПИ № ФС77-47354 from 03.04.11 г.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»  
86294

© State University ESPC, 2012

## Contents

### Theory of engineering structures.

#### Building units

<b>Blazhnov A.A.</b> Method of static calculation of the soft roof arch construction on wind loading.....	3
<b>Zeyniev G.A., Tyrin D.A., Ageev S.M., labudin B.V.</b> Bored pile for maintenance of stability of walls of a foundation ditch.....	8
<b>Kluyeva N.V., Shuvalov K.A.</b> Experimental study of survivability for prestressed reinforced concrete bar systems.....	13
<b>Petrov M.R., Petrova A.N.</b> Circuit analytical approach to hinged rod systems	23
<b>Yarygina O.V.</b> The calculation of concrete beam reliability according to the criterion of durability armature by limiting information on design stage.....	29

### Architecture and town-planning

<b>Kolchunov V.I., Bruma E.V.</b> Proposals for a quantitative evaluation of elements of urban environment needs limited mobility groups.....	35
---	----

### Construction materials and technologies

<b>Gorshenin V.P.</b> New approach to the problem solution of central controlling of simultaneous demand of heating and hot water supply in water systems of district heat supply.....	39
<b>Kolpakov A.V., Abdрахimov V.Z.</b> Study of heaving ratio and phase composition at various stages of slate clay baking.....	50
<b>Ladaev N.M., Jbanov N.S.</b> Influence of rotation of the rotor on change of air temperature in the rotor mill.....	59
<b>Lukuttsova N.P., Pykin A.A., Ustinov A.G., Kondrik A.S.</b> Corrosion behavior of concrete with admixture of silica-carbon nano-modifier.....	62
<b>Ogurtzova V.A., Ogurtzov A.V., Mitrofanov A.V., Aleshina A.P.</b> A non line ar cell model of fluidization in the technooogy of construction materials production..	68

## **СПОСОБ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА МЯГКОЙ КРОВЛИ АРОЧНОГО СООРУЖЕНИЯ НА ВЕТРОВУЮ НАГРУЗКУ**

*В статье изложен способ статического расчета кровли арочного сооружения из конструкционных тканей и пленок с учетом ее деформирования от ветровой нагрузки. Рассматриваемое арочное сооружение разработано для фермерских и личных хозяйств. Использование деформированной расчетной схемы кровли позволяет более точно учесть особенности ее напряженного состояния при ветровых воздействиях. Рассмотрены два варианта устройства мягкой кровли: без ветровых канатов и с ветровыми канатами. Установлено, что при деформированной расчетной схеме значения усилий в материале кровли и нагрузок на каркас уменьшаются.*

**Ключевые слова:** арочное сооружение, мягкая кровля, ветровая нагрузка, статический расчет кровли, деформированная расчетная схема.

В качестве кровли совмещенного утепленного покрытия арочного сооружения, разработанного для фермерских и личных хозяйств, возможно использование конструкционных тканей и пленок с периодической их заменой в процессе эксплуатации [1]. Например, в связи с низкой стоимостью целесообразно использование стабилизированной полиэтиленовой и сэвильеновой (этиленвинилацетатной) пленок долговечностью соответственно 3-4 года и 5-7 лет. Для уменьшения ветровых воздействий кровельный материал должен укладываться с некоторым натяжением и крепиться в коньке и цоколе сооружения. При отрицательном ветровом давлении (отсосе), определяемом в соответствии с положениями [2], материал кровли будет деформироваться (рис. 1 а, б) и в нем, в зависимости от способа устройства кровли, возникнет одно- или двухосное напряженное состояние. В связи с этим растягивающие усилия в кровле целесообразно определять с учетом упругих деформаций материала, что будет соответствовать реальным условиям эксплуатации и позволит точнее установить схему приложения нагрузок к каркасу сооружения и их значения. В инженерных методах расчета (например, тентовых сооружений) деформации кровельного материала не учитываются [3]. В статье предлагается способ статического расчета мягкой кровли арочного сооружения, учитывающий в первом приближении деформации ее материала при воздействиях ветра. Рассмотрены два варианта устройства кровли: без применения и с использованием ветровых канатов (например, из искусственных материалов или стальных тросов в пластмассовой оболочке), натягиваемых поверх кровли параллельно торцам сооружения.

При кровле без ветровых канатов погонные (на 1 см) кольцевые усилия в материале (напряжения вдоль образующей равны нулю) от отрицательного давления ветра можно определить на основании следующего выражения:

$$S_I = (w - w_n) \rho_1, \quad (1)$$

где  $S_I$  – кольцевые погонные усилия, Н/см;  $\rho_1$  – радиус кривизны деформированной кровли, см;  $w$  – расчетная ветровая нагрузка, Па;  $w_n$  – нагрузка на каркас сооружения от предварительного натяжения материала кровли, Па.

$$w_n = \frac{S_{II}}{\rho_0} \approx \frac{0,15R}{\rho_0}, \quad (2)$$

где  $S_{II}$  – усилие в материале от предварительного натяжения, Н/см;  $R$  – расчетное сопротивление единицы ширины материала кровли, Н/см;  $\rho_0$  – радиус кривизны недеформированной кровли, см.

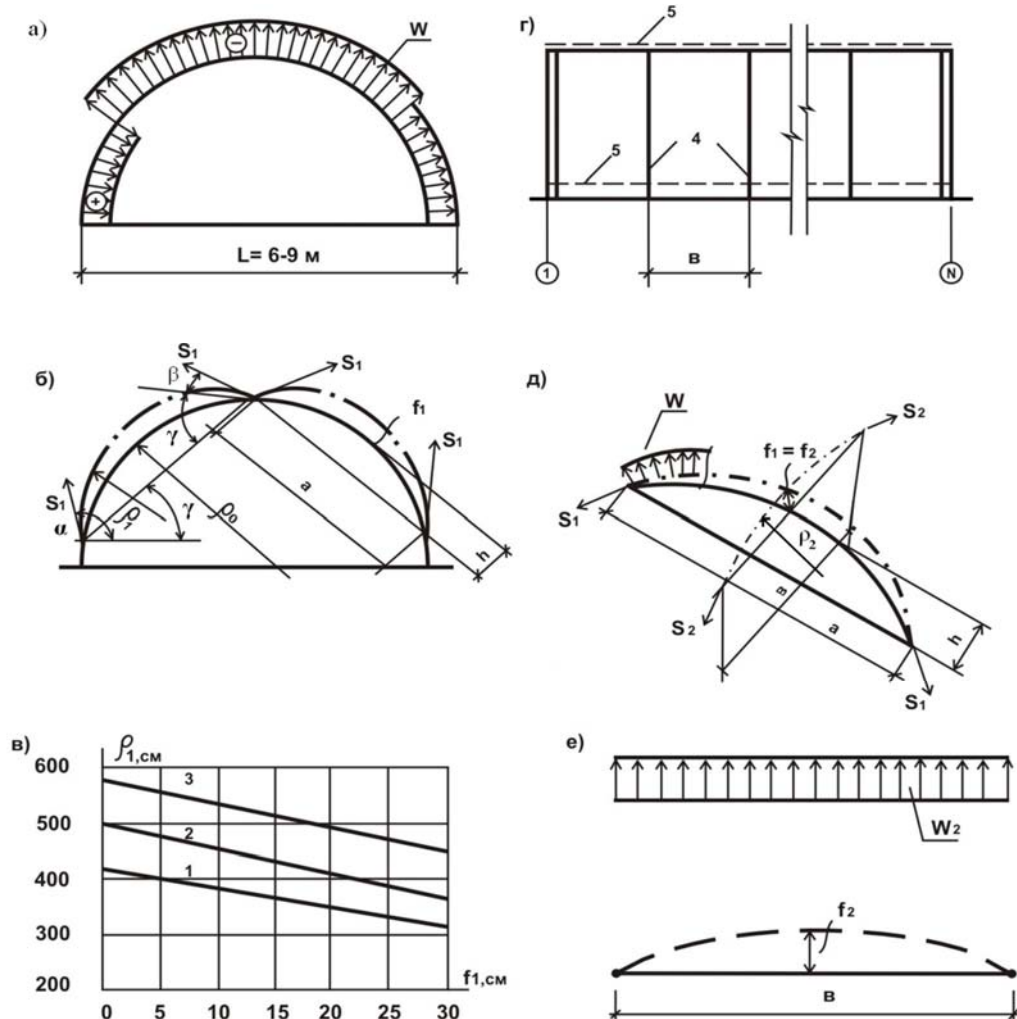


Рисунок 1 – К статическому расчету мягкой кровли сооружения: а – схема ветровой нагрузки на сооружение; б – схема сооружения с деформированной кровлей; в – графики изменения радиуса кривизны кровли; г – схема расположения ветровых канатов по длине сооружения; д – схема совместности деформаций в рассчитываемых нитях; е – расчетная схема нити между ветровыми канатами; 1 – пролет сооружения 6 м; 2 – пролет 7,5 м; 3 – пролет 9 м; 4 – ветровой канат; 5 – элементы крепления кровли в коньке и цоколе сооружения

Из (1) следует, что с уменьшением радиуса кривизны растягивающие усилия в материале кровли также должны уменьшаться. Для разработанных габаритных схем многофункционального арочного сооружения изменение  $\rho_1$  можно аппроксимировать следующей зависимостью (средняя относительная погрешность для пролетов на рисунке 1,  $a \leq 3\%$ ):

$$\rho_1 = \rho_0 \sqrt[3]{\frac{2,8h}{a} \frac{f_1}{\Delta l}}, \quad (3)$$

где  $a$  – расстояние между точками закрепления материала кровли – хорда (рис. 1, б);  $h$  – стрелка сегмента;  $\Delta l$  – удлинение материала кровли при деформировании.

Учитывая, что  $S_l/\delta = \sigma$  ( $\delta$  – толщина материала;  $\sigma$  – нормальные напряжения), определяем на основании закона Гука удлинение полосы материала кровли шириной 1 см при отсесе:

$$\Delta l = \frac{S_1 l_0}{E \delta} = \frac{(W - W_{II}) \rho_1 l_0}{E \delta}, \quad (4)$$

где  $l_0$  – длина дуги между закреплениями материала кровли в коньке и цоколе сооружения,  $l_0 = a + \frac{8h^2}{3a}$ ;  $E$  – модуль упругости материала кровли.

$$\text{Из (4) } \rho_1 = \frac{\Delta l E \delta}{(W - W_{II}) l_0}. \quad (5)$$

Приравнявая правые части (3) и (5), получим:

$$\frac{\Delta l^2 E \delta}{(W - W_{II}) l_0} = \rho_0 \sqrt[3]{\frac{2,8h}{a}} f_1. \quad (6)$$

Исходя из соотношений между элементами круга установлено, что в сегменте (рис. 1, б) приращение длины дуги пропорционально увеличению прогиба (при  $f_1 \leq 30$  см):

$$\Delta l = \frac{3f_1}{\sqrt[3]{\frac{a^2}{h^2}}}. \quad (7)$$

Из (6) и (7) определяем:

$$f_1 = \frac{0,16 \rho_0 (W - W_{II}) l_0 a}{E \delta h}. \quad (8)$$

Для упрощения формулы расчетных кольцевых усилий в кровельном материале изменение радиуса кривизны кровли при деформировании можно также представить линейной зависимостью (рис. 1, в).

$$\rho_1 = \rho_0 - k f_1, \quad (9)$$

где  $f_1$  – прогиб кровли (рис. 1, б);  $k$  – коэффициент равный 3,5 для пролета сооружения 6 и 4 м для пролетов 7,5 и 9 м.

Тогда, подставив (9) и (8) в (1), получим:

$$S = (W - W_{II}) \rho_0 \left( 1 - \frac{0,16k(W - W_{II}) l_0 a}{E \delta h} \right). \quad (10)$$

Максимальное кольцевое погонное усилие с учетом предварительного натяжения материала кровли  $S_{I \max} = S_I + S_{II}$ , где  $S_{II}$  определяется по (2).

Из зависимости (10) следует, что при использовании деформированной расчетной схемы кровли значения кольцевых усилий должны уменьшаться. Например, как показали подсчеты, при применении для кровли долговечной полиэтиленовой пленки значения расчетных усилий уменьшаются примерно на 20%. Усилия в материале кровли можно снизить посредством натяжения поверх кровли ветровых канатов параллельно торцам сооружения (см. рис. 1, з). Ветровая нагрузка при этом будет распределяться между канатами и продольными элементами крепления в коньке и цоколе сооружения. В материале кровли возникнут растягивающие напряжения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (см. рис. 1, д), связанные с радиусами кривизны кровли  $\rho_1, \rho_2$  и внешней нагрузкой известным уравнением Лапласа (давление на каркас сооружения от предварительного натяжения материала кровли пока не учитываем):

$$W = W_1 + W_2 = \frac{S_1}{\rho_1} + \frac{S_2}{\rho_2}, \quad (11)$$

где  $W$  – расчетная ветровая нагрузка, Па;  $W_1$  – ветровая нагрузка, воспринимаемая продольными элементами крепления кровли в коньке и цоколе сооружения, Па;  $W_2$  – ветровая нагрузка, воспринимаемая ветровыми канатами, Па;  $S_1$  – усилие вдоль направляющей (кольцевое), Н/см;  $S_2$  – усилие вдоль образующей, Н/см.

Значения  $W_1$  и  $W_2$  можно определить из условия равенства прогибов в пересекающихся нитях – полосах пленки шириной 1 см (см. рис. 1, д). Математическое выражение прогиба  $f_1$  по аналогии с (8):

$$f_1 = \frac{0,16 \rho_0 W_1 l_0 a}{E \delta h}. \quad (12)$$

Максимальный прогиб нити между ветровыми канатами при  $W_2 = W - W_1$  (рис. 1, е):

$$f_2 = \frac{M}{H},$$

где  $M = \frac{(W - W_1)db^2}{8}$  – балочный изгибающий момент ( $d$  – ширина полосы материала, равная 1 см;  $b$  – расстояние между ветровыми канатами);  $H$  – распор нити.

В нитях с малыми стрелками (прогибами) распор  $H$  практически не отличается от наибольшего усилия ( $S_2$ ) и его можно определить как распор струны [4]. Тогда для нити шириной  $d=1$  см:

$$S_2 = H = 3\sqrt{\frac{DEF}{2b}} = 3\sqrt{\frac{((W - W_1)d)^2 b^2 EF}{24}}, \quad (13)$$

где  $D = \int_b M q dx = \frac{q^2 b^3}{12} = \frac{((W - W_1)d)^2 b^3}{12}$  – характеристика нагрузки.

После преобразований получим:

$$f_2 = 0,36b \sqrt[3]{\frac{(W - W_1)b}{E\delta}}. \quad (14)$$

Приравняв правые части (12) и (14), после вычислений получим:

$$W_1^3 + kW_1 - kW = 0, \quad (15)$$

где  $k = \frac{11,4b^4 h^3 E^2 \delta^2}{a^3 l_o^3 \rho_o^3}$ .

$$\text{Из (15) } W_1 = \sqrt[3]{\frac{kW}{2} + \sqrt{D}} + \sqrt[3]{\frac{kW}{2} - \sqrt{D}} = 2\sqrt[3]{\frac{kW}{2}}, \quad (16)$$

где  $D = \left(\frac{kW}{2}\right)^2 + \left(\frac{k}{3}\right)^3$  – дискриминант кубического уравнения, являющийся малой величиной, которой можно пренебречь.

Максимальное кольцевое погонное усилие с учетом предварительного натяжения материала кровли:

$$S_{1max} = (W_1 - W_{II} \frac{W_1}{W})\rho_1 + S_{II} = (W_1 - W_{II} \frac{W_1}{W})\rho_1 + W_{II} \rho_o, \quad (17)$$

где  $W_{II}$  и  $\rho_1$  соответственно определяются по (2) и (9).

Направления кольцевых усилий (рис. 1, б) можно установить на основании следующих выражений:

$$\alpha \approx \gamma + \arccos \frac{a}{2\rho_1}; \quad \beta \approx \arcsin \frac{a}{2\rho_1} - \gamma. \quad (18)$$

Интенсивность кольцевых погонных усилий изменяется от  $S_{1max}$  в середине расстояния между ветровыми канатами до  $S_{II}$  в месте опирания кровельного материала на ветровой канат. Максимальные погонные усилия вдоль образующей (Н/см):

$$S_{2max} = \sqrt[3]{\frac{(W_2 - W_{II} \frac{W_2}{W})^2 d^2 b^2 EF}{24}} + W_{II} \rho_o. \quad (19)$$

### Вывод

Обобщая вышеизложенное, можно отметить, что применение деформированной расчетной схемы в статическом расчете мягкой кровли арочного сооружения позволяет точнее учесть особенности ее напряженного состояния при воздействиях ветра. Значения растягивающих усилий в материале кровли и нагрузок на каркас сооружения при этом уменьшаются.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блажнов, А.А. Многофункциональное производственное сооружение для фермерских хозяйств [Текст] / А.А. Блажнов, Н.Н. Андрианов // Сельское строительство. – 2007. – №3. – 4. – С. 26.

2. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* [Текст]. – М., 2011.
3. Зубарев, Г.Н. Конструкции из дерева и пластмасс [Текст] / Г.Н. Зубарев. – М.: Академия, 2008. – 304 с.
4. Уманский, А.А. Справочник проектировщика. Расчетно-теоретический [Текст] / А.А. Уманский. – В 2 кн. – Кн. 1. – М.: Стройиздат, 1972. – 600 с.

**Блажнов Александр Александрович**

Орловский государственный аграрный университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Агропромышленное и гражданское строительство»

Тел.: +7 (4862) 75-14-97

E-mail: uvarov\_av@bk.ru

---

BLAZHNOV A.A.

**METHOD OF STATIC CALCULATION OF THE SOFT ROOF  
ARCH CONSTRUCTION ON WIND LOADING**

*In article the way of static calculation of a roof of an arch construction from constructional fabrics and films with the account of its deformation from wind loading is stated. The considered arch construction is developed for farmer and personal economy. Use of the deformed settlement scheme of a roof allows to consider more precisely features of its tension at wind influences. Two variants of the device of a soft roof are considered: without wind ropes and with wind ropes. It is established that at the deformed settlement scheme of value of efforts in a material of a roof and loadings for a skeleton decrease.*

**Keywords:** *an arch construction, a soft roof, wind loading, static calculation of a roof, the deformed settlement scheme.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Blazhnov, A.A. Mnogofunkcional'noe proizvodstvennoe sooruzhenie dlja fermerskih hozjajstv [Tekst] / A.A. Blazhnov, N.N. Andrianov // Sel'skoe stroitel'stvo. – 2007. – №3. – 4. – S. 26.
2. SP 20.13330.2011. Nagruzki i vozdejstviya. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 2.01.07-85\* [Tekst]. – М., 2011.
3. Zubarev, G.N. Konstrukcii iz dereva i plastmass [Tekst] / G.N. Zubarev. – М.: Akademiya, 2008. – 304 s.
4. Umanskiy, A.A. Spravochnik proektirovshika. Raschjotno-teoreticheskij [Tekst] / A.A. Umanskiy. – V 2 kn. – Kn. 1. – М.: Strojizdat, 1972. – 600 s.

**Blazhnov Alexander Alexandrovich**

Oryol state agrarian university, Orel

Candidate of technical sciences, associate professor of department «Agroindustrial and civil construction»

Ph.: +7 (4862) 75-14-97

E-mail: uvarov\_av@bk.ru

ЗЕЙНИЕВ Г.Я., ТЮРИН Д.А., АГЕЕВ С.М., ЛАБУДИН Б.В.

## БУРОНАБИВНАЯ СВАЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕН КОТЛОВАНА

*В статье рассматривается конструкция буронабивной сваи для обеспечения устойчивости стен котлована, обеспечивающая значительную экономию арматуры. Приводятся общие сведения о границах использования буронабивных свай, аналитическое обоснование допустимости применения конструкции арматурного каркаса с сосредоточенным размещением арматурных стержней, а также обоснование экономической эффективности данного решения посредством уравнения регрессии высокой степени достоверности. Актуальность и целесообразность конструктивных решений подтверждается патентом на полезную модель.*

**Ключевые слова:** фундамент, буронабивная свая, котлован, арматурный каркас.

При возведении технически сложных и уникальных объектов одним из трудоемких видов работ являются земляные работы, так как подобные сооружения возводятся, в основном, заглубленными или подземными. Для устройства котлованов в условиях слабых грунтов (например, торфяников), а также плотной застройки в условиях городского строительства применяются буронабивные сваи [1, 2]. Они создают силовую конструкцию для устройства шпунтового ограждения, обеспечивающего возведение новых сооружений вблизи существующих. Как на этапе производства земляных работ, так и в процессе создания конструкций фундаментов нового сооружения традиционный способ с устройством заборки между буронабивными сваями является трудоемким процессом, а сама работа относится к работам повышенной опасности.

Для исключения опасной работы по устройству заборки применяются бурокасательные сваи. Бурокасательные сваи располагаются вплотную друг к другу, что обеспечивает устойчивость грунта без устройства шпунтового ограждения. Силовым элементом бурокасательных свай является армокаркас, который может собираться в приобъектном арматурном цехе или непосредственно на строительной площадке. Учитывая, что роль шпунтового ограждения выполняют сами бурокасательные сваи, общая стоимость и продолжительность работ оказывается существенно ниже, а выполнение работ становится безопасной, т.к. не связана с работами на глубине.

Традиционный арматурный каркас буронабивной сваи состоит из продольных стержней, установленных с равным шагом, и поперечных связей, выполненных в виде спиральной навивки. Недостатком такой конструкции арматурного каркаса, применяемого для укрепления стен котлована, является неравномерное распределение внутренних напряжений в продольных стержнях, установленных с равным шагом.

При обеспечении устойчивости стен котлована буронабивная свая является силовым элементом, воспринимающим нагрузку в поперечном направлении оси сваи, обусловленную давлением грунта со стороны укрепляемых стен котлована. Поскольку буронабивные сваи устанавливаются вдоль стен разрабатываемого котлована, то нагрузка на буронабивную сваю действует в направлении перпендикулярном поверхности стены котлована. Вдоль поверхности стены котлована нагрузка на буронабивные сваи практически отсутствует. Нагрузка от действия грунта стен котлована воспринимается продольными арматурными стержнями, расположенными в районе плоскости изгиба буронабивной сваи перпендикулярной стене котлована. Продольные стержни, расположенные в районе плоскости, проходящей через ось сваи параллельной поверхности стены котлована, нагрузку практически не воспринимают, т.к. нагрузка в этой плоскости от грунта стены котлована не действует. Таким образом, продольные стержни арматурного каркаса бурокасательных свай, применяемых для укрепления стен котлована, загружены неравномерно, что приводит к необоснованному расходу металла.

Несущая способность буронабивной сваи воспринимающей нагрузку от воздействия грунта стен котлована, определяется моментом инерции поперечного сечения продольных



стержней арматурного каркаса относительно центральной оси. Момент инерции поперечного сечения зависит от расстояния от арматуры до центральной оси и от площади поперечного сечения арматуры. Уменьшение шага продольных арматурных стержней в зоне, прилегающей к стене котлована, и диаметрально-противоположной зоне поперечного сечения буронабивной сваи приводит к увеличению момента инерции и увеличению несущей способности буронабивной сваи, что позволяет уменьшить диаметр продольных арматурных стержней без снижения прочности буронабивной сваи. Для сохранения момента инерции поперечного сечения каркаса буронабивной сваи необходимо, чтобы момент инерции каркаса сваи с уменьшенным диаметром продольных стержней был не меньше момента поперечного сечения каркаса традиционной буронабивной сваи [3].

На рисунке 1, а показаны продольные арматурные стержни традиционной буронабивной сваи, у которой стержни расположены с равномерным шагом по окружности диаметра  $D$ , соответственно одинаковыми углами установки  $\gamma$  продольных арматурных стержней. Представленный на рисунке 1, а арматурный каркас имеет одинаковый момент инерции по направлениям, показанным стрелками А и Б. При этом центральные моменты инерции при воздействии нагрузок в указанных направлениях будут равны:

$$J_0 = \pi \cdot d_0^2 \frac{D^2}{4} \sum_{i=0}^{n/4-1} \cos^2(i \cdot 360^\circ / n), \quad (1)$$

где  $d_0$  – диаметр продольных арматурных стержней известной буронабивной сваи;  $D$  – диаметр окружной установки продольных арматурных стержней;  $n$  – количество продольных арматурных стержней.

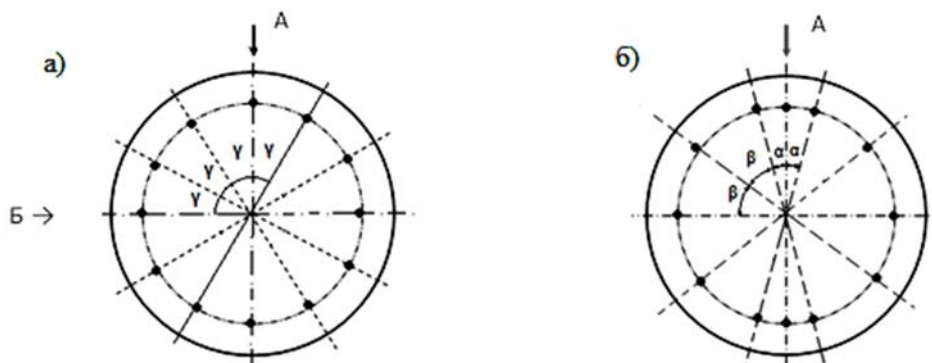


Рисунок 1 – Поперечное сечение сваи с различным размещением арматуры:  
а – равномерное распределение арматуры; б – сосредоточенное распределение арматуры

В условиях, когда буронабивная свая обеспечивает устойчивость стен котлована, арматурный каркас воспринимает нагрузку только по направлению действия нагрузки от вертикальной стенки котлована, действующей по стрелке А (рис. 1, б).

При такой нагрузке рационально сосредоточить вертикальные стержни каркаса в зоне, прилегающей к стене котлована, и в диаметрально противоположной зоне поперечного сечения арматурного каркаса. При этом шаг между арматурными стержнями уменьшается, соответственно в этой зоне уменьшается угол установки между арматурными стержнями, который становится равным  $\alpha$ , а центральный момент инерции поперечного сечения увеличивается. Это позволяет уменьшить диаметр продольных стержней арматурного каркаса при сохранении несущей способности буронабивной сваи с неравным шагом арматурных стержней.

Центральный момент инерции ( $J_m$ ) сваи с уменьшенным диаметром ( $d_m$ ) арматурных стержней с неравным шагом вычисляется по формуле:

$$J_m = \pi d_m^2 \frac{D^2}{4} \left[ \sin^2 \left( \frac{90^\circ - (n/4 - 2) \arcsin \frac{L}{D}}{2} \right) + \sum_{i=0}^{n/4-2} \cos^2 \left( 2i \cdot \arcsin \frac{L}{D} \right) \right], \quad (2)$$

где  $L$  – уменьшенный шаг между продольными стержнями арматурного каркаса ( $L = D \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$ ) вычисляется из геометрических соображений (рис. 2, б).

Остальные обозначения соответствуют обозначениям, принятым в формуле (1).

Для сохранения несущей способности буронабивной сваи, обеспечивающей устойчивость стен котлована с меньшим диаметром арматурных стержней, необходимо выполнить соотношения:

$$J_m \geq J_0.$$

Приравняв выражения (1) и (2), определяем уменьшенный диаметр продольных арматурных стержней буронабивной сваи с неравным шагом арматурных продольных стержней:

$$d_m \geq d_0 \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n/4-1} \cos^2(i \cdot 360^\circ / n)}{\sin^2 \left( \frac{90^\circ - \left( \frac{n}{4} - 2 \right) \cdot \arcsin \frac{L}{D}}{2} \right) + \sum_{i=0}^{n/4-2} \cos^2 \left( 2i \cdot \arcsin \frac{L}{D} \right)}} \quad (3)$$

где  $d_m$  – уменьшенный диаметр продольных арматурных стержней;  $d_0$  – диаметр продольных арматурных стержней известной буронабивной сваи;  $n$  – общее количество продольных арматурных стержней;  $L$  – уменьшенный шаг продольных арматурных стержней;  $D$  – диаметр окружности установки продольных арматурных стержней.

Такая конструкция арматурного каркаса буронабивной сваи, предназначенного для обеспечения устойчивости стен котлована, позволяет уменьшить расход металла без уменьшения несущей прочности буронабивной сваи.

В таблице 1 приведены данные по расходу арматуры при равномерном и сосредоточенном размещении стержней на примере сваи с 12-ю продольными арматурными стержнями различного диаметра ( $d=12 \dots 28$  мм).

Таблица 1 – Расход арматуры при равномерном и сосредоточенном размещении стержней для сваи с 12-ю продольными арматурными стержнями

Диаметр продольных арматурных стержней при равномерном размещении, мм	Диаметр продольных арматурных стержней при сосредоточенном размещении, мм	Экономия арматуры на 1 п.м. сваи, кг	Площадь арматуры при равномерном размещении стержней, см <sup>2</sup>	Площадь арматуры при сосредоточенном размещении стержней, см <sup>2</sup>
12	8	5,88	13,572	6,036
14	8	9,72	18,480	6,036
16	10	11,52	24,120	9,42
18	10	16,56	30,480	9,42
20	12	18,96	37,680	13,572
22	12	25,08	45,600	13,572
25	14	31,68	58,920	18,480
28	16	39	73,920	24,120

На рисунке 2 представлен график, демонстрирующий тенденцию экономии арматуры при увеличении диаметра продольных стержней. Вдоль оси абсцисс представлены диаметры стержней при равномерном размещении, вдоль оси ординат – значения экономии стали на 1 п.м. сваи с учетом сосредоточенного размещения стержней соответствующего диаметра (см. табл. 1). Также представлена линия тренда выявленной тенденции с уравнением регрессии и значением достоверности аппроксимации.



**Рисунок 2 – График экономии арматуры при увеличении диаметра продольных стержней с линией тренда (пунктиром обозначен график экономии стали при сосредоточенном размещении арматуры по данным вычислений, сплошной линией обозначен график экономии стали при сосредоточенном размещении арматуры на основании уравнений регрессии)**

На основании анализа данных получено следующее экспоненциальное уравнение:

$$y = 5,28 \cdot e^{0,2574 \cdot x}, \tag{4}$$

где  $x$  – диаметр продольной арматуры при равномерном размещении стержней в теле сваи, мм;  $y$  – показатель экономии стали при сосредоточенном размещении стержней, кг на 1 п.м.

Таким образом, используя график на рисунке 2 и уравнение (4) несложно оценить экономические преимущества сосредоточенного размещения стержней в теле сваи при неизменном моменте инерции вдоль оси концентрации арматуры.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 19804.6-1983. Сваи полые круглого сечения и сваи-оболочки железобетонные составные с ненапрягаемой арматурой. Конструкции и размеры [Текст]. – М.: Минстрой России, 1983. – 17 с.
- Смородинов, М.И. Справочник строителя. Основания и фундаменты [Текст] / М.И. Смородинов. – М.: Строиздат, 1983 г. – 146 с.
- Пат. 95341 Российская Федерация. Бурунабивная свая для обеспечения устойчивости стен котлована [Текст] / С.М. Агеев, Г.Я. Зейниев, М.Н. Ерофеев.

**Зейниев Габил Ясинович**  
 ФГУП «УСС № 35 при Спецстрое России»  
 Главный инженер  
 Тел.: +7-921-477-30-11  
 E-mail: uss35@atnet.ru

**Тюрин Дмитрий Алексеевич**  
 Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный институт, г. Санкт-Петербург  
 Магистрант  
 Тел.: +7-909-555-14-78  
 E-mail: d.a.tyurin@yandex.ru

**Агеев Сергей Михайлович**  
 Военно-технический университет при Спецстрое России  
 Кандидат технических наук, профессор  
 Тел.: +7-906-728-07-43

**Лабудин Борис Васильевич**  
 Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова  
 Доктор технических наук, профессор  
 Тел.: +7-911-554-09-99  
 E-mail: labudin@rambler.ru

ZEYNIIEV G.A., TYURIN D.A. AGEEV S.M., LABUDIN B.V.

## BORED PILE FOR MAINTENANCE OF STABILITY OF WALLS OF A FOUNDATION DITCH

*The article deals with the construction of bored piles for the sustainability of the walls of the pit, providing significant savings fixtures. Provides an overview of the limits of the use of bored piles, an analytical justification of the admissibility of the reinforcing cageconstruction with concentrated placing rebar, as well as economic efficiency rationale for this decision by the regression equation a high degree of reliability. The relevance and appropriateness of design solutions is confirmed by a patent for utility model.*

**Keywords:** *the base, bored pile, a foundation ditch, reinforcing skeleton.*

### BIBLIOGRAPHY

1. GOST 19804.6-1983. Svai polye kruglogo sechenija i svai-obolochki zhelezobetonnye sostavnye s nena-prjagaemoj armaturoj. Konstrukcii i razmery [Tekst]. – M.: Ministroj Rossii, 1983. – 17 s.
2. Smorodinov, M.I. Spravochnik stroitelja. Osnovaniya i fundamenty [Tekst] / M.I. Smorodinov. – M.: Stroizdat, 1983 g. – 146 s.
3. Pat. 95341 Rossijskaja Fkederacija. Buronabivnaja svaja dlja obespechenija ustojchivosti sten kotlovana [Tekst] / S.M. Ageev, G.Ja. Zejniev, M.N. Erofeev.

#### **Zeyniev Gabil Asinovich**

FSUC «USS № 35 at spechstroy Russia»  
Chief engineer  
Ph.: +7-921-477-30-11  
E-mail: uss35@atnet.ru

#### **Tyurin Dmitry Alekseevich**

Saint-Petersburg state architectural and building university, Saint-Petersburg  
Post-graduate student  
Ph.: +7-909-555-14-78  
E-mail: d.a.tyurin@yandex.ru

#### **Ageev Sergey Mihailovich**

Military-technical university at spechstroy Russia  
Candidate of technical sciences, professor  
Ph.: +7-906-728-07-43

#### **Labudin Boris Vasilyevich**

Northern (Arctic) federal university named after M.V. Lomonosov  
Doctor of technical sciences, professor  
Ph.: +7-911-554-09-99  
E-mail: labudin@rambler.ru

КЛЮЕВА Н.В., ШУВАЛОВ К.А.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИВУЧЕСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОЧНЫХ СИСТЕМ\*

*Приведены методика и основные результаты экспериментальных исследований параметров живучести статически нагруженной и динамически догружаемой предварительно напряженной неразрезной трехпролетной железобетонной балочной системы. Показано, что использование в качестве расчетных статико-динамических диаграмм деформирования бетона и арматуры, учитывающих динамическое упрочнение, позволяет достаточно строго оценивать динамические эффекты в таких системах.*

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования, живучесть конструктивных систем, динамические догрузки, балочная система, статико-динамические диаграммы.

Возросшее число аварий и высокая степень износа эксплуатируемых объектов капитального строительства в стране обозначили необходимость разработки новых концепций создания и эксплуатации строительных систем, коренным образом отличающихся от существующих и удовлетворяющих современным вызовам природного и техногенного характера. Развитие теории конструктивной безопасности и создание основ живучести зданий и сооружений, как одного из наиболее перспективных направлений по снижению числа аварийных ситуаций или ущерба при их возникновении, требует проведения новых экспериментальных исследований по этому направлению. Одной из неизученных задач рассматриваемой проблемы живучести стержневых конструктивных систем является экспериментальное исследование силового сопротивления предварительно напряженных железобетонных статически неопределимых балок в запредельных состояниях при внезапном выключении одного из несущих элементов.

Для решения поставленной задачи были запроектированы две серии опытных конструкций трехпролетных неразрезных сборно-монолитных предварительно напряженных железобетонных балок. Каждая из них включала три сборные железобетонные балки с гибким каналообразователем. Объединение балок в трехпролетную сборно-монолитную неразрезную предварительно напряженную балку осуществлялось соединительными элементами и замоноличиванием стыков (рис. 1).

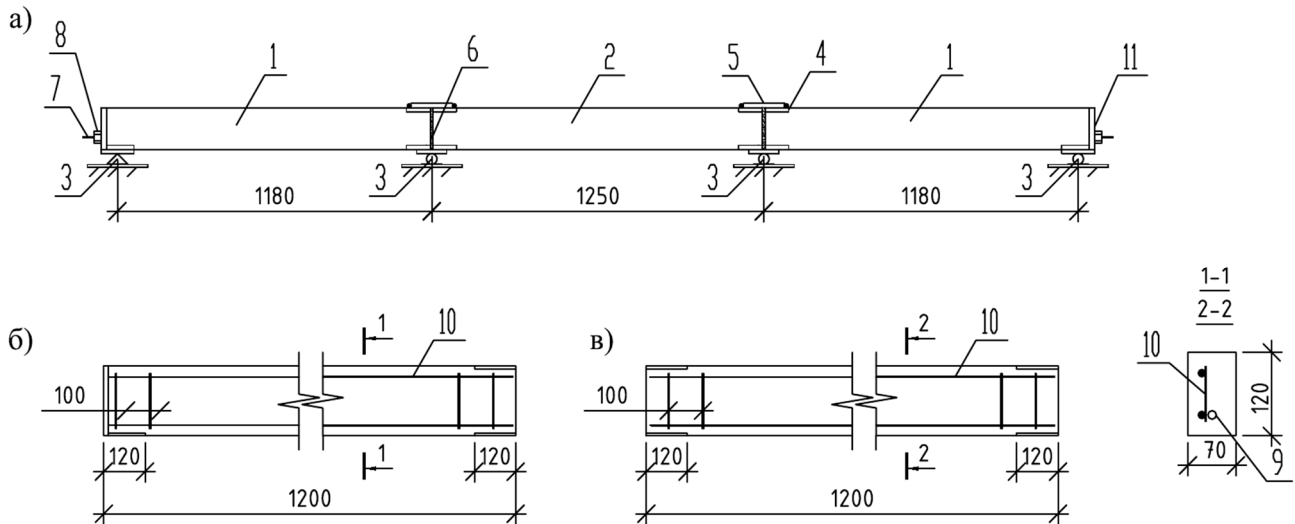
Сборные балки запроектированы сечением 70×120 мм, длиной 1200 мм из бетона класса В25. Армирование сборных балок обеих серий принято плоскими сварными каркасами с продольной арматурой в верхней зоне диаметром 6 мм класса А-III для восприятия усилий растяжения в стадии предварительного обжата. Продольная арматура нижней зоны и поперечные стержни выполнены из проволоки диаметром 5 мм. Шаг поперечной арматуры был принят 100 мм. На опорах балок были установлены закладные детали из листовой стали. На торцы крайних балок с целью недопущения смятия бетона при передаче на него усилия предварительного обжата так же были установлены закладные детали из листовой стали толщиной 8 мм. При бетонировании балок в них были предусмотрены каналообразователи внутренним диаметром 12 мм для установки арматурного стержня и последующего напряжения всей неразрезной балки. Предварительное напряжение трехпролетной балки осуществлялось затяжкой гаек с контролем усилия натяжения по усилиям и удлинениям.

Изготовление опытных конструкций производилось на производственной базе ДОО «Орловский завод ЖБИ» ОАО «Орелагропромстрой». Армирование изделий было выполнено

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (соглашение 14.В37.21.0292).

строго по проекту. Проектный состав бетона корректировали при помощи пробных замесов. Дозировка компонентов производилась по массе. Бетонирование балок производили в жесткой разъемной металлической опалубке с уплотнением вибрированием. Из бетона одновременно с укладкой его в форму изготавливали контрольные призмы и кубики, которые так же уплотняли и подвергали термовлажностной обработке вместе с опытной конструкцией. Количество призм и кубиков составляло по 8 штук, что достаточно для контроля прочности бетона после термообработки и на день испытания изделия.



**Рисунок 1 – Схема опытной конструкции сборно-монолитной балки (а) и конструкции сборных балок Б-I (б) и Б-II (в): 1, 2 – сборные железобетонные балки Б-I и Б-II соответственно; 3 – опорное устройство; 4 – соединительная закладная деталь; 5 – прокалиброванный соединительный элемент; 6 – шов замоноличивания; 7 – предварительно напрягаемый арматурный стержень; 8 – гайка для создания преднапряжения; 9 – гибкий каналобразователь; 10 – арматурный каркас; 11 – торцевая закладная деталь**

Испытания балок производились на специально запроектированном стенде, включавшем опорные устройства, рычажную систему, распределительные устройства, грузовую платформу и штучные грузы (рис. 2, а).

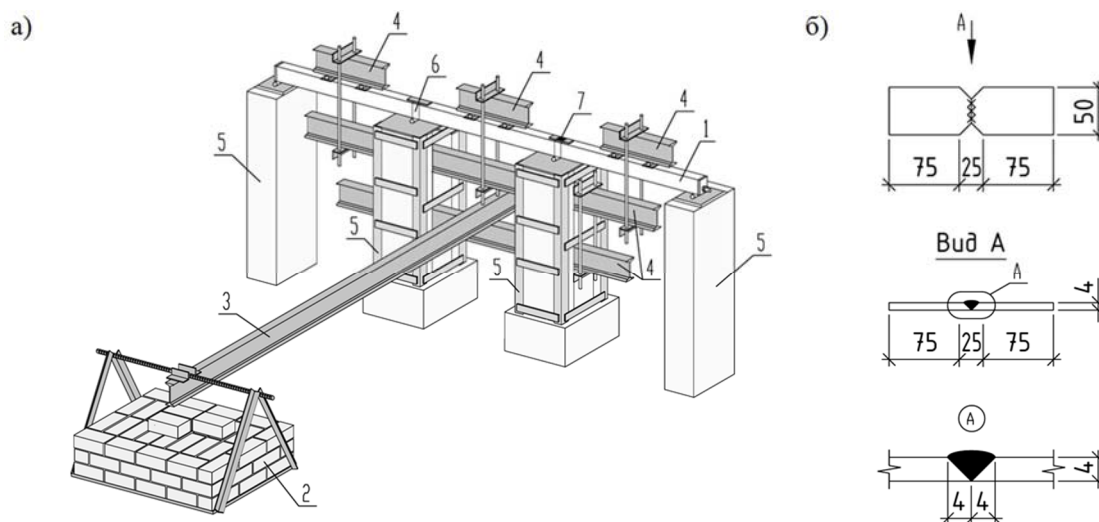
Пространство между торцами балок на промежуточных опорах замоноличивалось бетоном класса В30, а балки между собой соединялись с помощью закладных деталей, одна из которых над второй промежуточной опорой выполнялась сварной с длиной и катетом шва, прокалиброванными под разрушение при заданном уровне статического нагружения (рис. 2, б).

В готовом изделии, установленном на испытательный стенд, не было выявлено начальных дефектов (технологических, усадочных трещин, отслоений защитного слоя, отколов бетона). Для более контрастного проявления и обнаружения трещин на растягиваемые поверхности перед испытанием был нанесен слабый раствор мела и на каждой ступени нагружения поверхность балок промакивалась губкой, смоченной уайт-спиритом.

Испытательная нагрузка создавалась штучными грузами, укладываемыми на грузовую платформу.

Запроектное воздействие соответствовало мгновенному уменьшению опорного изгибающего момента над второй промежуточной опорой с заданной проектной величины до нуля. Осуществлялось такое приложение запроектного воздействия вследствие хрупкого разрыва сечения надопорного соединительного элемента от растягивающего усилия, действующего в этом элементе, при приложении к балке проектной расчетной нагрузки. В процессе испытаний измерялись и фиксировались следующие величины: продольные деформации сжатого и растянутого бетона; деформации растянутых соединительных элементов (калиброванных накладок); прогибы балок во всех пролетах, в том числе при приложении запроектной нагрузки; уровень нагрузки и характер трещинообразования и ширина раскрытия трещин до и после

приложения запроектной нагрузки; общая картина и характер разрушения опытных образцов всех серий при внезапном хрупком разрушении сварного шва соединительного элемента;ращения перемещений и время первого полупериода колебаний, возникающих в элементах предварительно напряженных балок после внезапного разрушения надпорного соединения.



**Рисунок 2 – Схема экспериментального стенда для испытаний неразрезной балки на запроектные воздействия (а), конструкция прокалиброванной закладной детали (б):**  
 1 – опытная конструкция балки; 2 – нагрузочная платформа с грузами; 3 – рычаг;  
 4 – распределительные устройства; 5 – опоры; 6 – надпорная соединительная деталь;  
 7 – прокалиброванная соединительная деталь

Для измерения деформаций, перемещений и фиксации момента трещинообразования преднапряженной неразрезной балочной конструкции на нее устанавливались прогибомеры, индикаторы часового типа и тензорезисторы (с каждой стороны опытных образцов). Всплеск перемещений элементов балочной системы после запроектного воздействия фиксировались цифровой камерой с частотой кадров 60 Гц. Для определения времени первого полупериода динамических колебаний использовался виброанализатор Вибран 3.0. Ширину раскрытия трещин измеряли при статическом нагружении и после запроектного воздействия с использованием микроскопа МПБ-2. Общий вид испытаний и схемы установки механических приборов и тензорезисторов на опытной конструкции представлены на рисунках 3, 4.



**Рисунок 3 – Общий вид испытаний неразрезных балок на живучесть (а) и конструкция надпорной прокалиброванной детали (б)**

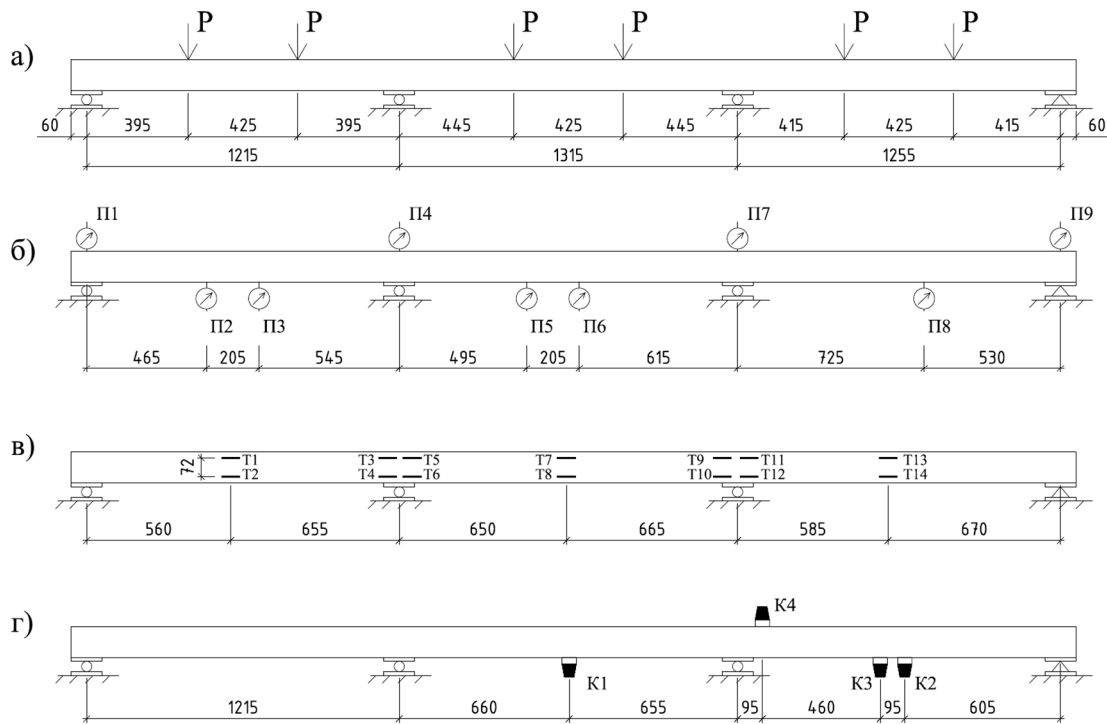


Рисунок 4 – Схема приложения проектной нагрузки (а) и схемы установки прогибомеров (б), тензорезисторов (в) и датчиков вибронализатора (г)

В процессе экспериментальных исследований предусматривалось испытание основных образцов (неразрезных железобетонных балок) и вспомогательных (бетонных кубов и призм). Вспомогательные образцы предназначались для получения прочностных и деформационных характеристик бетона, в частности  $R_b$ ,  $E_b$  и полной диаграммы бетона « $\sigma_b - \varepsilon_b$ ».

Для создания внезапного запроектного воздействия на конструкцию балки надопорный соединительный элемент был заранее калиброван на разрывной машине под значение расчетного изгибающего момента над второй промежуточной опорой. С целью исключения пластического характера разрушения этого элемента он изготавливался из двух половинок предварительно упрочненной вытянутой стали, которые сваривались между собой. Проектное нагружение балки осуществлялось ступенями по 0,05 от разрушающей нагрузки до разрыва соединительного элемента. Его разрыв вызывал внезапное динамическое воздействие.

До проектной нагрузки балки нагружались двумя сосредоточенными силами в каждом пролете. При первом загрузении балок запроектной нагрузкой значение действующей на балку статической нагрузки составляло  $P = 0,5[P] = 2,65 \text{ кН}$ . При этой нагрузке величина изгибающего момента в исследуемом сечении балки равнялась  $M_n^c = 0,636 \text{ кН} \cdot \text{м}$ , кривизна, соответствующая этому моменту, имела значение  $\chi_n^c = 6,615 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{мм}}$ , а прогиб составлял  $f_n^c = 0,58 \text{ мм}$ .

Анализ полученных опытных значений деформаций, перемещений и трещин в элементах обеих испытанных конструктивных систем позволяет отметить следующее. Процесс нагружения балок до уровня проектной нагрузки соответствовал деформационной модели, используемой при кратковременном нагружении статически прикладываемой нагрузкой, стадиям ее упругого и упругопластического деформирования (рис. 5).

Высокая сходимость измеренных в опытах деформаций бетона при статическом нагружении проектной нагрузкой с теоретическими значениями, вычисленными по расчетной модели [1], подтвердили приемлемость использования этой теоретической модели для расчета статического участка диаграммы « $M - \chi$ ».



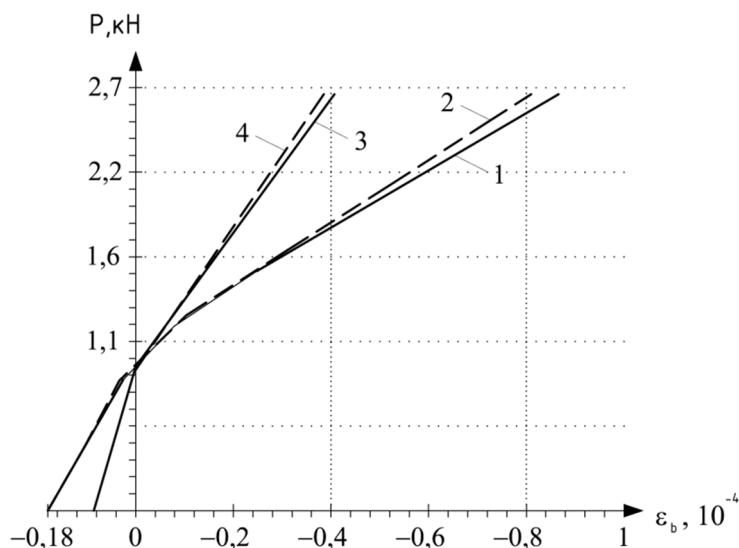


Рисунок 5 – Диаграммы изменения фибровых напряжений бетона при проектных воздействиях: 1, 2 – теоретическая и экспериментальная для среднего сечения правого пролета, 3, 4 – тоже для среднего пролета

Запроектная нагрузка создавалась мгновенно – величина опорного момента над промежуточной опорой уменьшалась с заданного проектного значения до нуля. Технически это осуществляется путем разрыва по сварному шву надопорной моментной связи растягивающим усилием, действующим в ней. Нагружение балки внезапным динамическим воздействием производилось при проектной нагрузке на балку.

В результате мгновенного разрыва сварного шва в надопорном соединительном элементе над второй промежуточной опорой степень статической неопределимости балки уменьшилась на единицу и в ней возникли затухающие во времени колебания одного пролета справа от опоры с выключенной связью и двух пролетов слева. Изгибающие моменты и соответственно кривизны в этих неразрушенных частях балки в течение первого полупериода колебаний превышали соответствующие моменты и кривизны, если бы переход дважды статически неопределимой конструкции в один раз статически неопределимую и статически определенную балки осуществлялся не в результате мгновенного разрушения опорного сечения, а путем его медленной принудительной разгрузки от значения действующего в опорном сечении момента до его нулевого значения. Значения статических моментов ( $M^c$ ) и соответствующих им кривизн ( $\chi^c$ ) для сечения в средней части третьего пролета в исходной дважды статически неопределимой балке и образованной после квазистатического разрушения опорного сечения один раз статически неопределимой балке обозначены соответственно точками  $a$  и  $b$  (рис. 6).

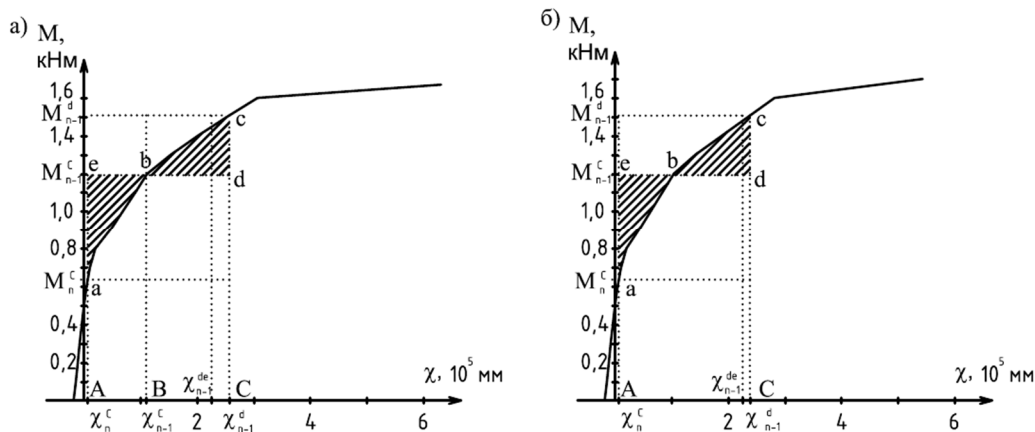
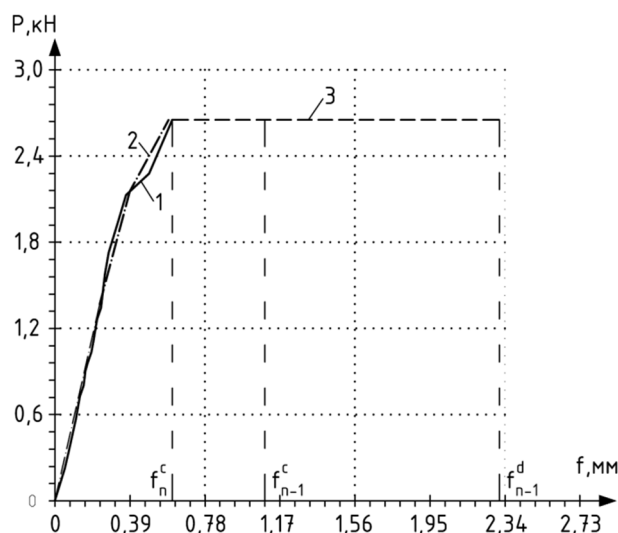


Рисунок 6 – К определению параметров динамического догружения с использованием статических (а) и статико-динамических (б) диаграмм состояния сечения

В соответствии с результатами расчета опытной конструкции первой серии, если бы переход дважды статически неопределимой в один раз статически неопределимую балку осуществлялся квазистатически, расчетные параметры для среднего поперечного сечения третьего пролета имели бы следующие значения:  $M_{n-1}^c = 1,192 \text{ кН} \cdot \text{м}$ ;  $\chi_{n-1}^c = 1,018 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{мм}}$ ;  $f_{n-1}^c = 1,19 \text{ мм}$ .

После запротного воздействия произошло динамическое догружение всей системы, вызванное внезапным выключением моментной связи и уменьшением статической неопределимости системы на единицу. При этом прогиб в средней части третьего пролета, составлявший до выключения связи 0,61 мм, мгновенно увеличился на 1,70 мм (рис. 7).



**Рисунок 7 – Диаграммы «нагрузка-прогиб» в среднем поперечном сечении:**  
 1, 2 – экспериментальная и расчетная кривые при статическом нагружении до проектного уровня; 3 – кривая с характерными значениями прогибов при динамическом догружении;  $f_n^c$  – экспериментальный прогиб перед приложением запротного воздействия;  $f_{n-1}^c$  – теоретически определенный прогиб при квазистатическом изменении расчетной схемы;  $f_{n-1}^d$  – экспериментально полученное значение прогиба при динамическом догружении

Время первого полупериода колебаний рассматриваемого пролета балки, полученное по показаниям видеокамеры, составило порядка 0,02 с. Более точное значение времени первого полупериода колебаний было получено с использованием показаний виброанализатора Вибран 3.0 и составило  $t_d = 0,017 \text{ с}$  (рис. 8).

На энергетической основе по методике [2] была проведена теоретическая оценка динамических эффектов во внезапно повреждаемой предварительно напряженной железобетонной неразрезной балке. Из условия постоянства полной удельной энергии элемента были получены следующие значения динамического изгибающего момента, кривизны и прогиба:

$$M_{n-1}^d = 1,507 \text{ кН} \cdot \text{м}; \chi_{n-1}^d = 2,56 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{мм}}; f_{n-1}^d = 2,81 \text{ мм} \text{ (см. рис. 6, а).}$$

Сопоставление экспериментально определенных значений параметров деформирования с расчетными, полученными с использованием в качестве расчетных диаграмм состояния бетона и стали при статическом нагружении с соответствующими пределами прочности  $R_b = 13,5 \text{ МПа}$  и  $\sigma_R = 450 \text{ МПа}$ , свидетельствует о том, что экспериментальные значения этих величин значи-

тельно ниже теоретических (рис. 9). Это можно объяснить тем, что при высокоскоростном нагружении существенно изменяются прочностные пределы материалов [3].

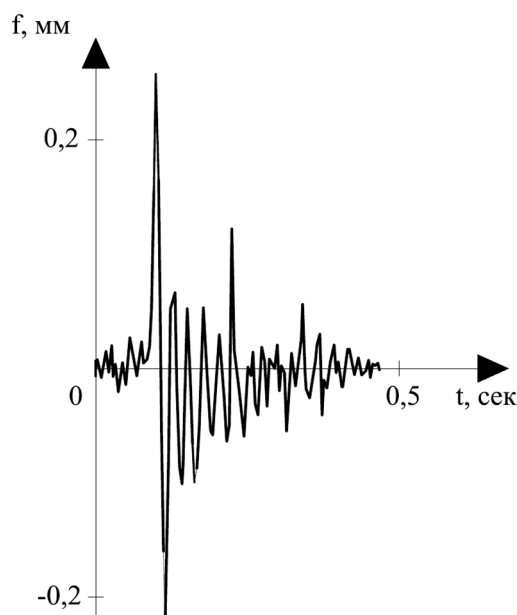


Рисунок 8 – Виброграмма колебаний средней части правого пролета опытной балки

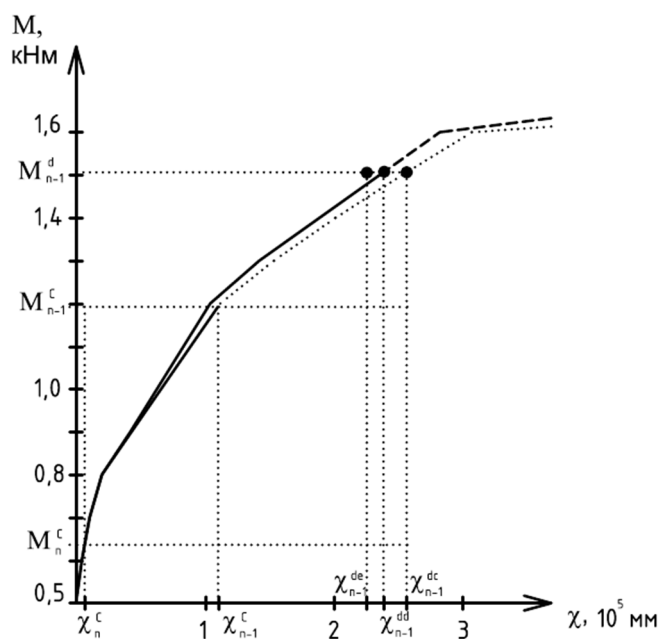


Рисунок 9 – К сопоставлению расчетных и опытных значений кривизн при запроектном воздействии:  $\chi_{n-1}^{de}$  – экспериментальное значение;

$\chi_{n-1}^{dd}$  – расчетное по статико-динамическим диаграмме;  $\chi_{n-1}^{dc}$  – по статической диаграмме

Была проведена оценка динамических эффектов с учетом динамического упрочнения материалов, для чего динамическую ветвь диаграммы состояния сечения « $M - \chi$ » построим с использованием в качестве расчетных статико-динамических диаграмм состояния материалов (см. рис. 6, б).

В результате расчета методом последовательного приближения получены следующие значения параметров деформирования сечения при динамическом догружении с заданного уровня эксплуатационной нагрузки:

- время динамического воздействия  $t_d = 0,017 \text{ сек.}$ ;
- прочность бетона при динамическом догружении со скоростью  $v_b = 570 \text{ МПа/сек.}$   
( $\varphi = 1,24$ )  $R_b^{dd} = 16,2 \text{ МПа}$ ;
- прочность стали при динамическом догружении ( $\varphi_s = 1,1$ )  $\sigma_R^{dd} = 462 \text{ МПа}$ ;
- величина усилия  $M_{n-1}^d = 1,506 \text{ кН} \cdot \text{м}$ ;
- кривизна  $\chi_{n-1}^d = 2,36 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{мм}}$ ;
- прогиб  $f_{n-1}^d = 2,58 \text{ мм}$ .

Сопоставление результатов расчета значений параметров деформирования, выполненного с заменой статических диаграмм деформирования бетона и стали статико-динамическими, с экспериментальными данными позволяет сделать вывод об их более строгом соответствии (см. рис. 9).

Из анализа диаграмм состояния сечения следует, что при внезапном динамическом догружении напряжения в арматурном стержне достигли предела текучести, а деформации в бетоне получили большие пластические деформации, чем они могли бы составлять, если бы уменьшение статической неопределимости происходило квазистатически. Это является объяснением столь значительного приращения прогибов на первой полуволне колебаний и отсутствия дальнейшего значительного колебания перемещений конструктивных элементов.

Уместно так же отметить, что, согласно результатам расчета, предел прочности бетона увеличивается на 20%, в то время как предел прочности стали увеличивается всего на 2,6%. Это объясняется тем, что конструктивные элементы выполнялись с предварительным напряжением и к моменту запроектного воздействия напряжения в бетоне, сжатом от внешней нагрузки, были весьма незначительны и соответствовали упругой работе, тогда как напряжения в арматуре были близки к предельным значениям.

В результате запроектного воздействия в средних сечениях первого и второго пролетов опытных конструкций балок образовались трещины. Моменты в пролетных сечениях левой и средней балок, возникшие вследствие внезапного динамического воздействия, превышали соответственно в 1,39 и 1,92 раза момент трещинообразования. Полученная картина трещинообразования явилась еще одним подтверждением наличия динамического эффекта в оставшихся неразрушенными частях балки при мгновенном разрушении моментной связи над второй опорой (рис. 10).

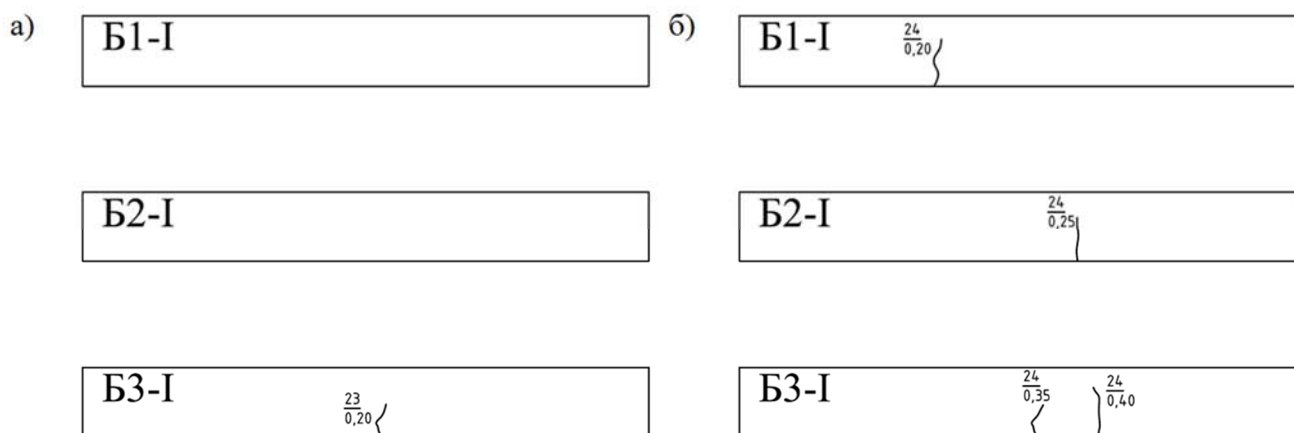


Рисунок 10 – Общая картина трещин в опытных образцах первой конструктивной системы до (а) и после (б) запроектного воздействия

Расчетные значения ширины раскрытия трещин до запроектного воздействия и при  $M_{n-1}^d = 1,506 \text{ кН} \cdot \text{м}$ , определенные по методике [4], составили соответственно 0,23 мм и 0,49 мм. Несколько завышенное расчетное значение ширины раскрытия трещины при запроектном воздействии по отношению к экспериментальному (0,40 мм) объясняется зажатием трещин преднапряженной конструкции при уменьшении действующего усилия до  $M_{n-1}^c$ .

Полученные результаты экспериментальных исследований параметров живучести предварительно напряженных железобетонных балочных конструктивных систем в предельных и запредельных состояниях и их сопоставление с расчетными величинами, определенными с учетом динамического упрочнения материалов, позволили установить особенности деформирования и трещинообразования таких систем при внезапных выключениях в них одного из ключевых нагруженных элементов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко, В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона [Текст] / В.М. Бондаренко, Вл.И. Колчунов. – М.: АСВ, 2004. – 472 с.
2. Клюева, Н.В. Исследование динамических догрузений в железобетонных неразрезных балках с использованием статико-динамических диаграмм / Н.В. Клюева, К.А. Шувалов // Вестник МГСУ. – 2011. – №2. – Т. 2. – С. 145-152.
3. Гениев, Г.А. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях [Текст] / Г.А. Гениев, В.И. Колчунов, Н.В. Клюева, А.И. Никулин, К.П. Пятикрестовский. – М.: АСВ, 2004. – 216 с.
4. СП 52-102-2004. Предварительно напряженные железобетонные конструкции [Текст]. – М.: ГУП ЦПП, 2005. – 36 с.

#### **Клюева Наталия Витальевна**

Юго-западный государственный университет, г. Курск

Доктор технических наук, профессор кафедры «Проектирование, строительство зданий и линейных сооружений»

Тел.: +7 (4712) 50-48-16

E-mail: klynavit@yandex.ru

#### **Шувалов Константин Александрович**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел

Ассистент кафедры «Строительные конструкции и материалы»

Тел.: +7 (4862) 73-43-49

E-mail: kshuvalov@gmail.com

---

KLYUEVA N.V., SHUVALOV K.A.

### **EXPERIMENTAL STUDY OF SURVIVABILITY FOR PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE BAR SYSTEMS**

*The paper presents methods and main results of experimental study of survivability parameters for statically loaded and dynamically overloaded pre-stressed three-span continuous beam. The study shows that static-dynamic diagram for concrete and steel bar reinforcement with dynamic strengthening is applicable for dynamic effect assessment for such systems.*

**Keywords:** *experimental study, survivability of structural systems, additional dynamic load, bar systems, static-dynamic diagram.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Bondarenko, V.M. Raschetnye modeli silovogo soprotivlenija zhelezobetona [Tekst] / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov. – M.: ASV, 2004. – 472 s.
2. Kljueva, N.V. Issledovanie dinamicheskikh dogruzhenij v zhelezobetonnyh nerazreznyh balkah s ispol'zovaniem statiko-dinamicheskikh diagramm / N.V. Kljueva, K.A. Shuvalov // Vestnik MGSU. – 2011. – №2. – T. 2. – S. 145-152.
3. Geniev, G.A. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnyh konstrukcij pri zaproektnyh vozdeystvijah [Tekst] / G.A. Geniev, V.I. Kolchunov, N.V. Kljueva, A.I. Nikulin, K.P. Pjaticrestovskij. – M.: ASV, 2004. – 216 s.
4. SP 52-102-2004. Predvaritel'no naprjazhennye zhelezobetonnye konstrukcii [Tekst]. – M.: GUP CPP, 2005. – 36 s.

**Klyueva Natalia Vitalyevna**

Southwest state university, Kursk

Doctor of technical science, professor of department «Design, construction of buildings and linear constructions»

Ph.: +7 (4712) 50-48-16

E-mail: klynavit@yandex.ru

**Shuvalov Konstantin Aleksandrovich**

State university – educational-science-production complex, Orel

Assistant of department «Construction structures and materials»

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

E-mail: kshuvalov@gmail.com

ПЕТРОВ М.Р., ПЕТРОВА А.Н.

## ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ К РАСЧЕТУ ШАРНИРНО-СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

В статье на основе аналогий, выявленных при расчете электрических цепей и шарнирно-стержневых систем, допускающих большие деформации в процессе эксплуатации, предложен метод узловых координат для подсчета перемещений узлов. В этом методе перемещение координат узлов шарнирно-стержневой системы является аналогом разности потенциалов электрической цепи. Использование предложенного метода дает возможность не применять известный метод последовательных нагружений, что экономично и весьма перспективно. Проведенный численный эксперимент показал высокую эффективность предложенного метода.

**Ключевые слова:** шарнирно-стержневые конструкции, большие перемещения, метод узловых координат, электромеханические аналогии, гидротехническое сооружение.

### 1. Вывод уравнений метода узловых координат

Теория стержневых систем и теория электрических цепей развивались в математическом смысле очень изолированно, поэтому применение аналитических методов электротехники к расчету шарнирных стержневых конструкций может дать хорошие результаты, тем более, что все соотношения между параметрами шарнирных стержневых конструкций справедливы и для их аналогов в теории электрических цепей, а с учетом масштабных коэффициентов совпадение и численное [1].

Исследуем возможность применения принципа, положенного в основу электротехнического «метода узловых потенциалов» [1] к расчету шарнирной стержневой системы. Для простоты рассуждений (общность выводов не нарушается) пусть конструкция будет плоской, задача стационарная, реакции опор считаются просто силами в узлах.

На рисунке 1 приведена расчетная схема произвольной конструкции. Здесь система индексации заменена на принятую в теоретической электротехнике.  $\bar{P}_i$  – внешняя сила в узле  $i$ ;  $l_{ij}$  – начальная длина стержня между узлами  $i$  и  $j$ ;  $N_{ij}$  – усилие в стержне между узлами  $i$  и  $j$ ;  $E_{ij}$ ,  $S_{ij}$  – модуль упругости и площадь поперечного сечения стержня;  $m_{ij}$ ,  $n_{ij}$  – направляющие косинусы стержня.

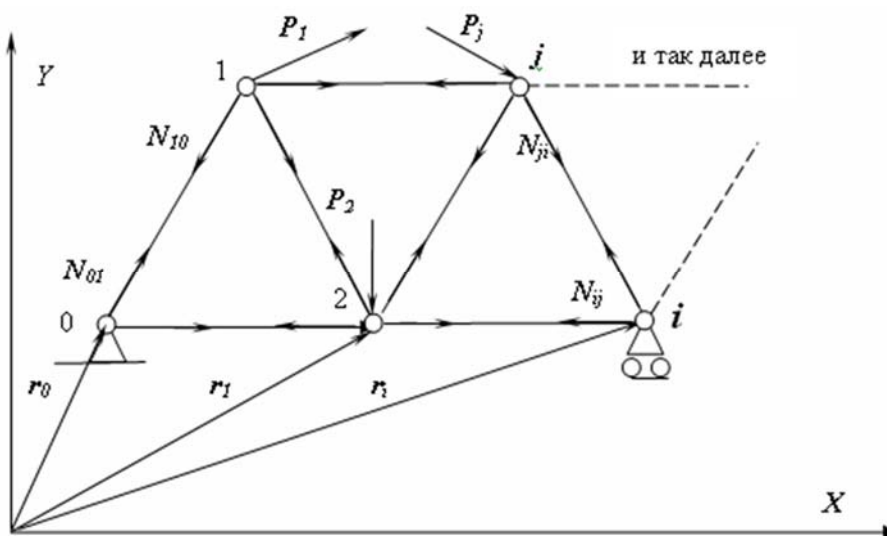


Рисунок 1 – Расчетная схема конструкции

Запишем условия равновесия сил в узлах конструкции. Сумму внешних сил, приложенных к узлу, в том числе и реакцию опоры, обозначим  $\vec{P}$ . Для  $i$ -го узла получим:

$$\sum_{j=1}^f N_{ij} \vec{k}_{ij} + \vec{P}_i = 0, \quad (1)$$

где  $f$  – количество стержней, сходящихся в узле  $i$ . Число независимых уравнений (1) равно количеству узлов минус один.

Исследуем изменения длины стержня в процессе деформации, используя выражение  $(l_{ij} \pm \Delta l_{ij}) \vec{k}_{ij}$ , где  $\vec{k}_{ij}$  орт-вектор стержня, его направляющие косинусы –  $m_{ij}$  и  $n_{ij}$ . Длину стержня можно выразить из соотношения векторов в треугольнике, составленном из самого стержня с индексами  $ij$  и  $\vec{r}_i, \vec{r}_j$  – радиус-векторов узлов стержня:

$$(l_{ij} \pm \Delta l_{ij}) \vec{k}_{ij} + \vec{r}_j - \vec{r}_i = 0. \quad (2)$$

Здесь стержень с индексами  $ij$  является замыкающим вектором контура, две другие стороны которого есть  $\vec{r}_i$  и  $\vec{r}_j$ . Знак удлинения  $\Delta l_{ij}$  в конкретном стержне определяется знаком усилия в этом стержне  $N_{ij}$ , а значение рассчитывается из скалярного соотношения, полученного с использованием закона Гука:

$$\Delta l_{ij} = N_{ij} \frac{l_{ij}}{E_{ij} S_{ij}}. \quad (3)$$

В общем случае  $E_{ij}$  и  $S_{ij}$  являются функциями  $N_{ij}$ , но для иллюстрации сущности подхода ограничимся случаем, когда их изменением можно пренебречь и они постоянны в процессе нагружения. Выражение (2) при таких условиях имеет вид:

$$\left( l_{ij} + N_{ij} \frac{l_{ij}}{E_{ij} S_{ij}} \right) \vec{k}_{ij} + \vec{r}_j - \vec{r}_i = 0.$$

Выразим продольное усилие в стержне  $N_{ij}$ :

$$N_{ij} \vec{k}_{ij} = [(\vec{r}_i - \vec{r}_j) - l_{ij} \vec{k}_{ij}] \frac{E_{ij} S_{ij}}{l_{ij}}.$$

Подставив выражение для продольного усилия в условия равновесия (1), получим:

$$\sum_{j=1}^f [(\vec{r}_i - \vec{r}_j) - l_{ij} \vec{k}_{ij}] \frac{E_{ij} S_{ij}}{l_{ij}} + \vec{P}_i = 0. \quad (4)$$

Число уравнений системы линейных уравнений равно числу неизвестных в ней, система имеет единственное решение.

Раскроем систему уравнений (4) для произвольной статически неопределимой шарнирной стержневой системы. Проиллюстрируем подход на примере конструкции, приведенной на рисунке 2. Одну из опор, закрепленную неподвижно, помещаем в начале координат так, чтобы расчетная схема полностью располагалась в первом квадранте, тогда  $\vec{r}_0 = 0$ ,  $\vec{r}_i$  и  $\vec{r}_j$  всегда имеют положительные направляющие косинусы. Условий равновесия здесь четыре, но независимых уравнений только три, поэтому исключим из рассмотрения узел в начале координат. Кроме того учтем, что  $N_{ij} = N_{ji}$ ,  $\vec{k}_{ij} = -\vec{k}_{ji}$ .

$$\begin{aligned} [(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) - l_{12} \vec{k}_{12}] \frac{E_{12} S_{12}}{l_{12}} + [(\vec{r}_1 - \vec{r}_3) - l_{13} \vec{k}_{13}] \frac{E_{13} S_{13}}{l_{13}} + [(\vec{r}_1 - \vec{r}_0) - l_{10} \vec{k}_{10}] \frac{E_{10} S_{10}}{l_{10}} + \vec{P}_1 &= 0, \\ [(\vec{r}_2 - \vec{r}_3) - l_{23} \vec{k}_{23}] \frac{E_{23} S_{23}}{l_{23}} + [(\vec{r}_2 - \vec{r}_0) - l_{20} \vec{k}_{20}] \frac{E_{20} S_{20}}{l_{20}} + [(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) - l_{21} \vec{k}_{21}] \frac{E_{21} S_{21}}{l_{21}} + \vec{P}_2 &= 0, \\ [(\vec{r}_3 - \vec{r}_0) - l_{30} \vec{k}_{30}] \frac{E_{30} S_{30}}{l_{30}} + [(\vec{r}_3 - \vec{r}_1) - l_{31} \vec{k}_{31}] \frac{E_{31} S_{31}}{l_{31}} + [(\vec{r}_3 - \vec{r}_2) - l_{32} \vec{k}_{32}] \frac{E_{32} S_{32}}{l_{32}} + \vec{P}_3 &= 0. \end{aligned}$$

Обозначим комбинацию параметров стержня (множители при квадратных скобках) через  $\omega_{ij}$ . Величина  $\omega_{ij}$  характеризует сопротивление стержня деформированию – это жесткость стержня, причем  $\omega_{ij} = \omega_{ji}$ . Тогда после несложных преобразований, с учетом того, что  $\vec{r}_0 = 0$ , получим:



$$\begin{cases} \vec{r}_1(\omega_{12} + \omega_{13} + \omega_{10}) - \vec{r}_2\omega_{12} - \vec{r}_3\omega_{13} = -\vec{P}_1 + l_{12}\omega_{12}\vec{k}_{12} + l_{13}\omega_{13}\vec{k}_{13} + l_{10}\omega_{10}\vec{k}_{10}, \\ -\vec{r}_1\omega_{21} + \vec{r}_2(\omega_{23} + \omega_{20} + \omega_{21}) - \vec{r}_3\omega_{23} = -\vec{P}_2 + l_{23}\omega_{23}\vec{k}_{23} + l_{20}\omega_{20}\vec{k}_{20} + l_{21}\omega_{21}\vec{k}_{21}, \\ -\vec{r}_1\omega_{31} - \vec{r}_2\omega_{32} + \vec{r}_3(\omega_{31} + \omega_{31} + \omega_{32}) = -\vec{P}_3 + l_{30}\omega_{30}\vec{k}_{30} + l_{31}\omega_{31}\vec{k}_{31} + l_{32}\omega_{32}\vec{k}_{32}. \end{cases}$$

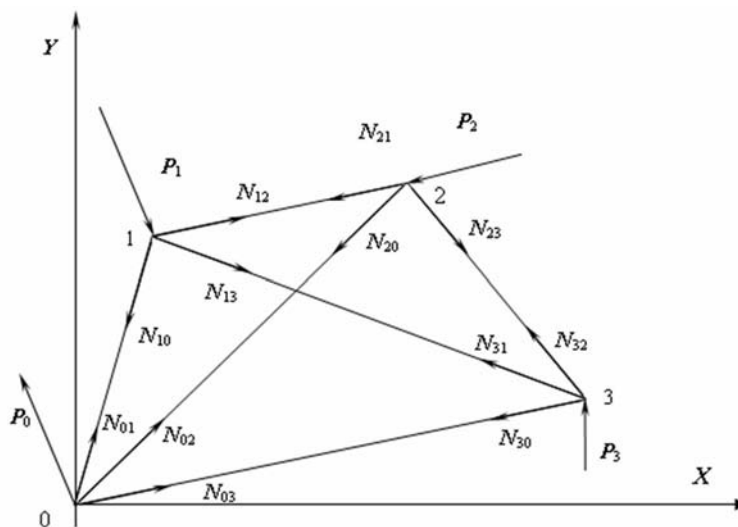


Рисунок 2 – Статически неопределимая шарнирно-стержневая система

Диагональные коэффициенты, состоящие из суммы жесткостей стержней сходящихся в узле, обозначим  $\omega_{ii}$  и по аналогии с другими  $\omega_{ij}$  назовем «узловой жесткостью», хотя физического смысла это не имеет. Будет удобнее, если в правой части системы уравнений заменим  $\omega_{ij}l_{ij} = E_{ij}S_{ij}$  и введем  $\omega_{ii} = -\sum_{j=1}^f \omega_{ij}$ , тогда:

$$\begin{cases} \vec{r}_1\omega_{11} + \vec{r}_2\omega_{12} + \vec{r}_3\omega_{13} = \vec{P}_1 - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{k}_{ij}, \\ \vec{r}_1\omega_{21} + \vec{r}_2\omega_{22} + \vec{r}_3\omega_{23} = \vec{P}_2 - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{k}_{ij}, \\ \vec{r}_1\omega_{31} + \vec{r}_2\omega_{32} + \vec{r}_3\omega_{33} = \vec{P}_3 - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{k}_{ij}. \end{cases} \quad (5)$$

Так как все расчеты ведутся в проекциях, преобразуем векторные уравнения (5) к скалярной форме для плоской конструкции, обозначив через  $x$  и  $y$  координаты узлов  $r(x_i, y_i)$ .

$$\begin{cases} x_1\omega_{11} + x_2\omega_{12} + x_3\omega_{13} = P_{x1} - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{m}_{ij}, \\ x_1\omega_{21} + x_2\omega_{22} + x_3\omega_{23} = P_{x2} - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{m}_{ij}, \\ x_1\omega_{31} + x_2\omega_{32} + x_3\omega_{33} = P_{x3} - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{m}_{ij}, \\ y_1\omega_{11} + y_2\omega_{12} + y_3\omega_{13} = P_{y1} - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{n}_{ij}, \\ y_1\omega_{21} + y_2\omega_{22} + y_3\omega_{23} = P_{y2} - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{n}_{ij}, \\ y_1\omega_{31} + y_2\omega_{32} + y_3\omega_{33} = P_{y3} - \sum_{j=1}^f E_{ij}S_{ij}\vec{n}_{ij}. \end{cases} \quad (6)$$

Эти уравнения составляют уравнения метода узловых координат.

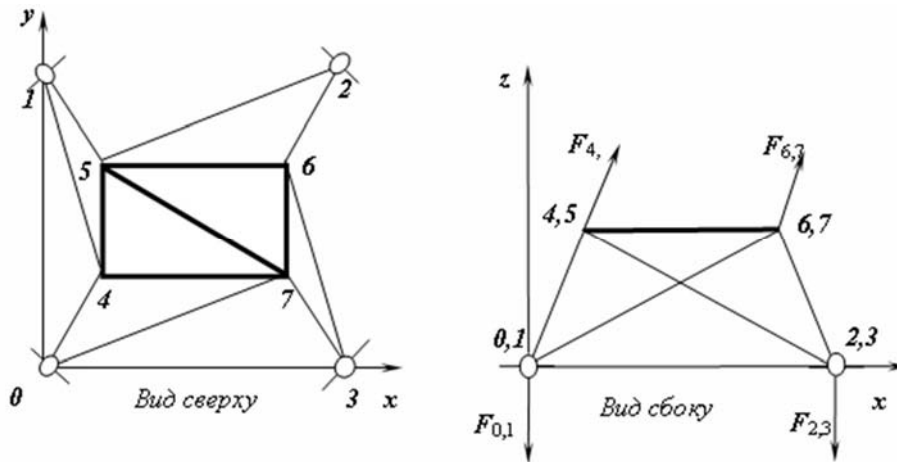
Возможно, что наибольший интерес представит использование уравнений в виде (6) для отслеживания в процессе нагружения шарнирно-стержневой конструкции координат ее узлов  $(x_i, y_i)$  при их расчете на жесткость. В этом случае усилия в стержнях и направляющие косинусы определяются перед текущими координатами узлов и система уравнений линейна относительно координат узлов [2].

Таким образом, в предлагаемой системе аналогом разности потенциалов электротехнической схемы для стержневой конструкции является разность координат концов каждого отдельного стержня.

**2. Практическое применение метода узловых координат**

В настоящее время для выращивания марикультур применяются специальные гидробиотехнические сооружения (ГБТС), представляющие собой стержневые системы, крепящиеся ко дну водоема при помощи тросов, якорей, анкеров и удерживающиеся на поверхности воды при помощи поплавков (рис. 3). При этом часть сооружения, несущая на себе марикультуры (основание), может иметь форму треугольника, прямоугольника и т.д. Для лучшего поступления питательных веществ основание должно быть подвижным. Благодаря этому перемещения узлов основания достигают больших значений (эти перемещения по величине сравнимы с размерами самой конструкции).

Для определения перемещения узлов можно воспользоваться методом узловых координат. Ниже приведена система уравнений метода узловых координат для определения перемещений узлов по оси  $z$  для ГБТС. По другим осям уравнения аналогичны.



*Рисунок 3 – Расчетная схема ГБТС с основанием в форме прямоугольника:  $F_4, F_5, F_6, F_7$  – результирующие силы в узлах;  $F_0, F_1, F_2, F_3$  – реакции опор*

$$\begin{cases}
 z_4(\omega_{45} - \omega_{41} - \omega_{40} - \omega_{47}) + z_5(-\omega_{45}) + z_7\omega_{47} = \\
 = -F_4 + E_{45}S_{45}k_{45} - E_{41}S_{41}k_{41} - E_{40}S_{40}k_{40} + E_{47}S_{47}k_{47}; \\
 -z_4\omega_{45} + z_5(\omega_{45} - \omega_{56} - \omega_{57} - \omega_{52}) + z_6\omega_{56} + z_7\omega_{57} = \\
 = -F_5 - E_{45}S_{45}k_{45} - E_{56}S_{56}k_{56} + E_{57}S_{57}k_{57} - E_{52}S_{52}k_{52}; \\
 z_5\omega_{56} + z_6(-\omega_{56} + \omega_{67} - \omega_{62} - \omega_{63}) + z_7(-\omega_{67}) = \\
 = -F_6 - E_{56}S_{56}k_{56} - E_{67}S_{67}k_{67} - E_{62}S_{62}k_{62} - E_{63}S_{63}k_{63}; \\
 z_4\omega_{47} + z_5\omega_{57} + x_6(-\omega_{67}) + z_7(-\omega_{47} + \omega_{67} - \omega_{07} - \omega_{73} - \omega_{57}) = \\
 = -F_7 - E_{47}S_{47}k_{47} + E_{67}S_{67}k_{67} - E_{07}S_{07}k_{07} - E_{73}S_{73}k_{73} - E_{57}S_{57}k_{57}.
 \end{cases} \tag{7}$$

Решив систему уравнений, получим новые координаты узлов, а, следовательно, и их перемещения. В таблице 1 приведены перемещения для самого опасного случая – максимально возможной силы течения, которую выдерживает конструкция, приведенная на рисунке 3.

Полученные значения перемещений узлов совпадают с заданными в технических условиях для рассматриваемого вида конструкций.

Таблица 1 – Перемещения узлов шарнирно-стержневой конструкции (рис. 3) при максимальном течении воды

№ узла	Ось $x$	Ось $y$	Ось $z$
4	-0,328	-0,0001	0,155
5	-0,328	-0,019	-0,062
6	-0,266	0,001	0,273
7	-0,264	-0,018	0,055

### **Выводы**

1 Исследованная в статье конструкция шарнирно-стержневой системы является примером гидробиотехнического сооружения, допускающего большие деформации узлов, сопоставимые с длинами элементов этой системы.

2 Результаты численного эксперимента приводят к выводу о том, что метод узловых координат позволяет рассчитывать новые координаты узлов шарнирно-стержневой конструкции при больших перемещениях узлов после ее деформации.

3 Важной особенностью предлагаемого метода узловых координат является то, что при расчете сооружений подобного вида нет необходимости применения метода последовательного нагружения.

4 Можно с достаточной степенью уверенности предположить, что предложенный метод окажется экономичным и эффективным при расчете висячих, вантовых конструкций из различных материалов, в том числе и гиперэластичных.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Петров, М.Р. Применение метода аналогий для моделирования шарнирных ферм электрическими цепями [Текст] / М.Р. Петров, А.Н. Петрова, К.В. Жеребко // Комсомольский-на-Амуре госуд. техн. ун-т. – Комсомольск-на-Амуре, 1999. – 10 с.
2. Тарануха, Н.А. Математическая модель шарнирной стержневой системы с большими перемещениями узлов [Текст] / Н.А. Тарануха, К.В. Жеребко, А.Н. Петрова, М.Р. Петров // Известия вузов. Строительство. – 2003. – №3. – С. 12-18.

#### **Петров Михаил Радиевич**

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, г. Комсомольск-на-Амуре  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и анализ конструкций и процессов»  
Тел.: +7 962 296 09 44  
E-mail: mr.meganom@yandex.ru

#### **Петрова Анна Николаевна**

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, г. Комсомольск-на-Амуре  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ»  
Тел.: +7 909 897 70 36  
E-mail: petrovaan2006@yandex.ru

---

PETROV M.R., PETROVA A.H.

### **CIRCUIT THEORY ANALYTICAL APPROACH TO HINGED-ROD SYSTEMS**

*Basing on analogy in circuits and hinged – rod systems great deformation on-stream we have suggested knot coordinate method to calculate knot movement. In this method knot coordinate change in a hinged-rod system is the analogue of electric potential difference. This method enables to avoid us-*

*ing successive loading method and that is very economical and promising. Numerical experiment has shown high efficiency of the method suggested.*

**Keywords:** *hinged frameworks, great movements, method of knot coordinates, electromechanical analogy, hydro biotechnical structures.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Petrov, M.R. Primenenie metoda analogij dlja modelirovanija sharnirnyh ferm jelektricheskimi cepjami [Tekst] / M.R. Petrov, A.N. Petrova, K.V. Zhrebko // Komsomol'skij-na-Amure gosud. tehn. un-t. – Komsomol'sk-na-Amure, 1999. – 10 s.

2. Taranuha, N.A. Matematicheskaja model' sharnirnoj sterzhnevoj sistemy s bol'shimi peremewenijami uzlov [Tekst] / N.A. Taranuha, K.V. Zhrebko, A.N. Petrova, M.R. Petrov // Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. – 2003. – №3. – S. 12-18.

### **Petrov Michael Radievich**

Komsomolsk-na-amure state technical university, Komsomolsk-na-Amure

Candidate of technical science, associate professor of department «Mechanics and analysis of constructions and processes»

Ph: +7 962 296 09 44

E-mail: mr.meganom@yandex.ru

### **Petrova Anna Nikolaevna**

Komsomolsk-na-Amure state technical university, Komsomolsk-na-Amure

Candidate of technical science, associate professor at department «Computer software and computing»

Ph: +7 909 897 70 36

E-mail: petrovaan2006@yandex.ru

ЯРЫГИНА О.В.

**РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ  
БАЛКИ ПО КРИТЕРИЮ ПРОЧНОСТИ АРМАТУРЫ ПРИ  
ОГРАНИЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ НА СТАДИИ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

*Предложена новая методика расчета надежности железобетонной балки по критерию прочности арматуры при ограниченной статистической информации о параметре математической модели предельного состояния на стадии проектирования. Методика расчета рассмотрена на примере балки и может быть использована для расчета надежности балок по другим критериям и для других конструкций. Для описания случайных величин с ограниченной статистической информацией используется усеченная интервальная функция распределения вероятностей. Значение надежности находится в интервальном виде.*

**Ключевые слова:** надежность, прочность, случайная величина, функции распределения, интервал надежности.

Уровень безопасности и надежности строительного объекта определяется проектом, где закладываются те необходимые характеристики материалов, нагрузки и условия работы, которые обеспечат условия безопасности и надежности при дальнейшей эксплуатации зданий и сооружений.

Этот подход диктуется требованиями федерального закона №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», который вступил в силу с 1 июля 2010 года. В развитие требований закона с 1 сентября 2011 действует ГОСТ Р 54257-2010 «Надежность строительных конструкций и оснований», который предписывает обеспечение безопасности зданий и сооружений, подтвержденное расчетом. В качестве оценки безопасности и риска используется расчетный параметр – надежность, как способность конструкции выполнять свои функции в течение расчетного срока эксплуатации. Для расчетов надежности в приведенных нормативных документах рекомендуются вероятностно-статистические методы, которые допускается использовать по ГОСТ Р 54257-2010 при наличии достаточных статистических данных о параметрах в расчетных моделях. Однако на практике нередко возникает ситуация, в которой статистическая информация о параметрах ограничена и, следовательно, использование вероятностных методов для расчетов надежности согласно ГОСТ Р 54257-2010 недопустимо.

Железобетонная балка является одним из распространенных несущих элементов в зданиях и сооружениях. Балку можно представить как один элемент в системе или условно как самостоятельную механическую систему, состоящую из двух конструктивных элементов: арматуры и бетона. Отказ балки может наступить по одному из критериев работоспособности: по прочности, жесткости и трещиностойкости.

Рассмотрим методику расчета надежности железобетонной однопролетной шарнирно опертой балки прямоугольного сечения по критерию прочности арматуры на стадии проектирования.

Математическая модель предельного состояния по СП 52-101-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры» с учетом изменчивости параметров (отмеченных волнистой линией) примет вид:

$$\tilde{M} \leq \tilde{M}_{np} \quad \text{или} \quad \frac{\tilde{q}l^2}{8} \leq \tilde{\sigma}_T A_s (h_0 - 0,5x), \quad (1)$$

где  $\tilde{M}$  – расчетный изгибающий момент;  $\tilde{M}_{np}$  – предельный изгибающий момент, который может воспринять сечение балки по критерию прочности арматуры;  $\tilde{q}$  – нагрузка, действующая на балку;  $l$  – длина пролета балки;  $\tilde{\sigma}_T$  – предел текучести стали арматуры;  $A_s$  – площадь поперечного сечения арматуры;  $h_0$  – рабочая высота сечения;  $x$  – высота сжатой зоны бетона, принимаемая по СП 52-101-2003 для балки прямоугольного сечения  $x = \frac{R_s A_s}{b R_b}$ .

Параметры  $l$ ,  $A_s$ ,  $h_0$ ,  $x$  примем детерминированными величинами, а  $\tilde{q}$  и  $\tilde{\sigma}_T$  – случайными. Для общности и сокращения дальнейших записей обозначим:  $\tilde{M} = \frac{\tilde{q} l^2}{8} = X$  – нагрузка,  $\tilde{M}_{np} = A_s \tilde{\sigma}_T (h_0 - x/2) = Y$  – прочность балки по арматуре.

Условие события отказа запишется в виде:

$$X > Y. \quad (2)$$

Важнейшей частью проектирования здания является выявление всех воздействий, в том числе и нагрузок, действующих на конструкцию. Нагрузки и другие воздействия, действующие на строительные конструкции, не остаются постоянными в течение срока службы, а непрерывно меняются по некоторым законам распределения и представляют собой наиболее неопределенные величины, подчиняющиеся большему статистическому разбросу в отличие от изменчивости деформационных и прочностных характеристик материалов [2].

Обычно на здание или сооружение действует несколько различных нагрузок и воздействий, причем каждая из них представляет свой особенный процесс. Чтобы свести все эти внешние воздействия к одному обобщенному воздействию нужно разобраться в конкретных особенностях каждого воздействия и уметь их сочетать.

Допустим, что на балку действует нагрузка постоянная и полезная, представляющие собой стационарный случайный процесс, т.е. такой, в котором изменение характеристик случайной функции во времени происходит очень медленно, и который по [1, 3] описывается нормальным законом распределения:

$$F_X(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{S_X} \cdot e^{-\frac{(x-m_X)^2}{2S_X^2}} dx, \quad (3)$$

где  $m_X$  и  $S_X$  – математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение случайной величины  $X$ , соответственно.

Функция плотности распределения  $f_X(x)$ , как производная от  $F_X(x)$  по аргументу  $x$ , будет:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{S_X} \cdot e^{-\frac{(x-m_X)^2}{2S_X^2}}. \quad (4)$$

Случайную величину  $Y$  (прочность) можно описать различными распределениями в зависимости от полноты статистической информации. Рассмотрим новый вид арматуры класса А600С, разработанный ОАО «Северсталь» совместно с НИИЖБ [4], о которой известны точные максимальные, минимальные и средние значения предела текучести для стержней различных диаметров (от 12 до 40 мм), некоторые из которых приведенные в таблице 1. По данным ОАО «Северсталь» отпускная цена стали класса А600С превышает цену стали класса А500С на 4-5%. При переходе на применение арматурной стали класса А600С взамен класса А500С экономия составляет до 19% металла и 14% денежных средств. При замене арматуры класса А400 на А600С экономия достигает 30-35%.

Таблица 1 – Механические свойства исследованных партий стали класса А600С

Диаметр, мм	Предел текучести, $\sigma_T(\sigma_{0,2})$ , Н/мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление, $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение при растяжении		Угол изгиба при диаметре оправки $c=3d$
			$\delta_s$ , %	$\delta_p$ , %	
12	$\frac{799}{727-840}$	$\frac{860}{810-920}$	$\frac{15,56}{13,0-18,3}$	$\frac{5,1}{3,0-8,0}$	180°
14	$\frac{763}{750-777}$	$\frac{832}{820-843}$	$\frac{18,5}{18,0-19,0}$	$\frac{9,0}{9,0}$	180°
20	$\frac{794}{708-854}$	$\frac{894,3}{798-948}$	$\frac{15,0}{13,0-18,0}$	$\frac{4,33}{4,0-5,0}$	180°

В таблице 1 выше черты приведены средние значения  $\tilde{\sigma}_T$ , ниже – точные крайние значения  $\tilde{\sigma}_T$ , гарантируемые заводом.

Нами предлагается для описания случайной величины  $Y$  по [5] использовать функцию, названную нами усеченной интервальной функцией распределения вероятностей:

$$F_Y(y) = \begin{cases} 0, & y < m_Y, \\ \frac{y-m_Y}{y-a_Y}, & m_Y \leq y < b_Y, \\ 1, & y \geq b_Y, \end{cases} \quad \text{и} \quad \bar{F}_Y(y) = \begin{cases} 0, & y < a_Y, \\ \frac{b_Y-m_Y}{b_Y-y}, & a_Y \leq y < m_Y, \\ 1, & y \geq m_Y. \end{cases} \quad (5)$$

где  $a_Y$  и  $b_Y$  – точные нижняя и верхняя границы изменчивости случайной величины  $Y$ ,  $m_Y$  – среднее значение случайной величины  $Y$ .

Графически функции  $F_Y(y)$  и  $\bar{F}_Y(y)$  представлены на рисунке 1.

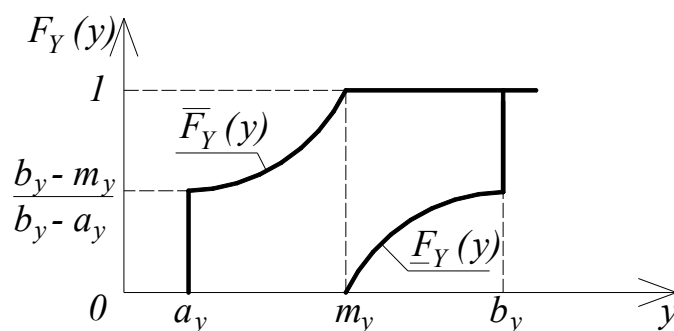


Рисунок 1 – Функции распределения  $F_Y(y) < F_Y(y) < \bar{F}_Y(y)$

Истинные, но неизвестные функции распределения  $F_Y(y)$  находится в границах  $F_Y(y) < F_Y(y) < \bar{F}_Y(y)$  множества функций  $\{F_Y(y)\}$ , возможных для описания  $y$ .

Соответствующие плотности распределения вероятности могут быть получены как производные от  $F_Y(y)$  и  $\bar{F}_Y(y)$  по аргументу  $y$ .

$$\rho_Y(y) = \begin{cases} 0, & y < m_Y, \\ \frac{m_Y - a_Y}{(a_Y - y)^2}, & m_Y \leq y < b_Y, \\ \frac{m_Y - a_Y}{b_Y - a_Y} \delta(y - b_Y), & y = b_Y, \\ 0, & y > b_Y, \end{cases} \quad \text{и} \quad \bar{\rho}_Y(y) = \begin{cases} 0, & y < a_Y, \\ \frac{b_Y - m_Y}{b_Y - a_Y} \delta(y - a_Y), & y = a_Y, \\ \frac{b_Y - m_Y}{(b_Y - y)^2}, & a_Y < y < m_Y, \\ 0, & y > m_Y, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\delta(y - a_y)$  – функция Дирака [6] или импульсная функция, сконцентрированная в точке  $a_y$ .

Для определения вероятности отказа  $X > Y$  используем общую формулу теории надежности по [2] для стохастически независимых случайных величин  $x_i$ :

$$Q = \int_V \dots \int_V \prod_{i=1}^n f_i(x_i) dx_i, \quad (7)$$

где  $V$  – область отказа;  $n$  – число случайных величин;  $f_i(x_i)$  – функция плотности распределения  $x_i$ .

Если в математической модели предельного состояния информация об одной случайной величине ограничена, то вероятность отказа будет характеризоваться нижним  $\underline{Q}$  и верхним  $\bar{Q}$  значениями. Формула (7) для двух параметров  $X$  (с полной информацией) и  $Y$  (с ограниченной информацией) с учетом условия отказа (2) запишется в виде:

$$\underline{Q} = \iint_V f_X(x) \underline{\rho}_Y(y) dy dx, \quad \bar{Q} = \iint_V f_X(x) \bar{\rho}_Y(y) dy dx, \quad (8)$$

где для  $\underline{Q}$  используется нижняя функция плотности распределения  $\underline{\rho}_Y(y)$ , т.к. из (2) видно, что с увеличением  $Y$  область отказа убывает. Для  $\bar{Q}$  правило подстановки функции плотности распределения меняется на противоположное.

Формулы (8) можно упростить, заменив интегралы  $\int_V \underline{\rho}_Y(y) dy$  и  $\int_V \bar{\rho}_Y(y) dy$  функциями  $\underline{F}_Y(y)$  и  $\bar{F}_Y(y)$  с заменой обозначения аргумента  $y$  на  $x$ , т.к. они одной физической природы [2]:

$$\underline{Q} = \int_V f_X(x) \underline{F}_Y(x) dx, \quad \bar{Q} = \int_V f_X(x) \bar{F}_Y(x) dx. \quad (9)$$

Расчетные формулы для определения вероятностей отказа с учетом (9), (8), (4) при  $y=x$  примут вид:

$$\begin{aligned} \underline{Q} &= \int_{m_y}^{b_y} \frac{1}{S_X \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m_X)^2}{2S_X^2}} \cdot \frac{y-m_y}{y-a_y} dx + \int_{b_y}^{\infty} \frac{1}{S_X \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m_X)^2}{2S_X^2}} dx. \\ \bar{Q} &= \int_{a_y}^{m_y} \frac{1}{S_X \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m_X)^2}{2S_X^2}} \cdot \frac{b_y-m_y}{b_y-x} dx + \int_{m_y}^{\infty} \frac{1}{S_X \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m_X)^2}{2S_X^2}} dx. \end{aligned} \quad (10)$$

Соответственно вероятность безотказной работы определяется по формулам:

$$\underline{P} = 1 - \bar{Q}, \quad \bar{P} = 1 - \underline{Q}.$$

Надежность будет характеризоваться интервалом  $[\underline{P}, \bar{P}]$ , в который попадает ее истинное значение.

### Пример

Пусть для железобетонной балки известны  $m_X = 700 \text{ Н/мм}^2$ ,  $S_X = 70 \text{ Н/мм}^2$ ;  $Y \in [727, 840] \text{ Н/мм}^2$ ,  $m_Y = 805 \text{ Н/мм}^2$ . Найдем надежность балки по критерию прочности арматуры. Предварительно найдем значения вероятностей отказа  $\underline{Q}$  и  $\bar{Q}$  по (10):  $\underline{Q} = 0,029$ ,  $\bar{Q} = 0,202$ .

Вероятности безотказной работы балки будут:  $\bar{P} = 1 - \underline{Q} = 1 - 0,029 = 0,971$ ,  $\underline{P} = 1 - \bar{Q} = 1 - 0,202 = 0,798$ .

Надежность балки будет характеризоваться интервалом  $[0,798; 0,971]$ .



Допустим, нам удалось снизить нагрузку до  $m_x = 600 \text{ Н/мм}^2$ ,  $S_x = 70 \text{ Н/мм}^2$ ;  $Y \in [727, 840] \text{ Н/мм}^2$ ,  $m_y = 805 \text{ Н/мм}^2$ . В этом случае надежность балки по критерию прочности арматуры будет характеризоваться интервалом  $[0,9840; 0,9995]$ .

### Выводы

1. Предложена новая комбинированная методика расчета надежности железобетонной балки по критерию прочности арматуры при ограниченной информации о некоторых параметрах математической модели предельного состояния на стадии проектирования.

2. Для описания параметров с ограниченной статистической информацией использовано усеченное интервальное распределение вероятностей.

3. Рассмотренная методика расчета надежности железобетонной балки может быть использована для расчета надежности балок по критерию прочности бетона.

4. Надежность балки в целом по критерию прочности заключается в интервале  $[\underline{P}_C, \bar{P}_C]$ , где  $\underline{P}_C = \underline{P}_1 \cdot \underline{P}_2$ ,  $\bar{P}_C = \bar{P}_1 \cdot \bar{P}_2$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржаницын, А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность [Текст] / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
2. Шпете, Г. Надежность несущих строительных конструкций [Текст] / Г. Шпете; пер. с нем. О.О. Андреева. – М.: Стройиздат, 1994. – 288 с.
3. Лычев, А.С. Надежность строительных конструкций [Текст] / А.С. Лычев. – М: АСВ, 2008. – 184 с.
4. Мадатян, С.А. Новая арматурная сталь класса А600С [Текст] / С.А. Мадатян, Л.А. Зборовский, Д.Е. Климов // Стройметалл. – 2010. – №5. – 7-10 с.
5. Ferson, S., Ginzburg, L., Akcakaya, R. Whereof one cannot speak: when input distributions are unknown. To appear in Risk Analysis, 1996.
6. Дирак, П.А. Принципы квантовой механики [Текст] / П.А. Дирак. – М.: Наука, 1979. – 481 с.

### Ярыгина Ольга Валентиновна

Вологодский государственный технический университет, г. Вологда

Аспирант кафедры «Промышленное и гражданское строительство»

Тел.: +7 (8172) 51-83-96

E-mail: Ola\_yarigina@mail.ru

---

YARYGINA O.V.

## THE CALCULATION OF CONCRETE BEAM RELIABILITY ACCORDING TO THE CRITERION OF DURABILITY ARMATURE BY LIMITING INFORMATION ON DESIGN STAGE

*The new methods of concrete beam reliability calculation according to the criterion of durability armature under the limiting information of mathematical model parameter to limiting state on design stage are used. Design procedure is considered on example of beam and will be can used for reliability calculation of beam to other criterions and other constructions. For the description of random quantity with limited statistical information the truncated interval function of probability distribution are used. Value of reliability is in the interval kind.*

**Keywords:** reliability, durability, random quantity, distribution functions, reliability interval.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Rzhanicyn, A.R. Teorija rascheta stroitel'nyh konstrukcij na nadezhnost' [Tekst] / A.R. Rzhanicyn. – M.: Strojizdat, 1978. – 239 s.
2. Shpete, G. Nadezhnost' nesuwih stroitel'nyh konstrukcij [Tekst] / G. Shpete; per. s nem. O.O. Andreeva. – M.: Strojizdat, 1994. – 288 s.
3. Lychev, A.S. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij [Tekst] / A.S. Lychev. – M: ASV, 2008. – 184 s.
4. Madatjan, S.A. Novaja armaturnaja stal' klassa A600S [Tekst] / S.A. Madatjan, L.A. Zborovskij, D.E. Klimov // Strojmetall. – 2010. – №5. – 7-10 s.
5. Ferson, S., Ginzburg, L., Akcakaya, R. Whereof one cannot speak: when input distributions are unknown. To appear in Risk Analysis, 1996.
6. Dirak, P.A. Principy kvantovoj mehaniki [Tekst] / P.A. Dirak. – M.: Nauka, 1979. – 481 s.

**Yarygina Olga Valentinovna**

Vologda state technical university, Vologda

Post-graduate student of department «Industrial and civil construction»

Ph.: +7 (8172) 51-83-96.

E-mail: Ola\_yarigina@mail.ru

УДК 316:61

КОЛЧУНОВ В.И., БРУМА Е.В.

## **ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ СООТВЕТСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ПОТРЕБНОСТЯМ МАЛОМОБИЛЬНЫХ ГРУПП НАСЕЛЕНИЯ**

*Предлагаются показатели для количественной оценки доступности и реализуемости инфраструктуры городской среды для маломобильных групп населения.*

**Ключевые слова:** маломобильные группы населения, показатель доступности, показатель реализуемости.

В последние два десятилетия была развернута работа по формированию доступной среды жизнедеятельности для маломобильных групп населения (МГН), по адаптации среды обитания человека для их нужд. Начиная с 2000 г. в систему нормативных документов по строительству введен специальный комплекс №35 «Обеспечение доступной среды жизнедеятельности для инвалидов и других маломобильных групп населения» [1].

В рамках Государственной программы «Доступная среда» на 2011-2015 годы, ФГБОУВПО «Госуниверситет – УНПК» был проведен мониторинг состояния доступности общественных зданий и сооружений социально-культурного и бытового назначения для инвалидов и маломобильных групп населения. В ходе анкетирования и обследования объектов общественных зданий и сооружений социально-культурного и бытового назначения, расположенных на территории г. Орла и Орловской области, были получены результаты, устанавливающие варианты доступности среды жизнедеятельности МГН в целях создания равных с другими гражданами возможностей для полноценного участия в жизни общества.

Систематизация функций и их составляющих, изложенная в работе [2], допускает возможность количественной оценки доступности и реализуемости инфраструктуры городской среды для различных слоев и групп населения.

В настоящей работе предлагаются показатели для количественной оценки соответствия некоторой территории (города, района и др.) потребностям маломобильных групп населения (МГН) в части удовлетворения составляющей «Жилье» функции «Жизнеобеспечения» и методика их численного расчета. К указанной группе населения относятся [3]: лица пожилого возраста, граждане с малолетними детьми, лица с ограниченными способностями и возможностями самостоятельно передвигаться, ориентироваться, общаться.

Пусть на рассматриваемой территории проживает  $N$  лиц МГН в  $M$  единицах жилья (комната, квартира, отдельный дом), причем в  $k$ -ой единице жилья проживает  $n_k$  лиц МГН. Тогда, очевидно,

$$\sum_{k=1}^M n_k = N. \quad (1)$$

Согласно нормативным документам [2], каждое жилье, где проживает лицо МГН, должно соответствовать группе параметров  $t_i^H$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ), представленных в числовом (равенства / неравенства) либо в качественном (да / нет) виде. Каждому из  $p$  параметров экспертами устанавливается безразмерная величина – вес  $l_i$ ,  $0 \leq l_i \leq 1$ . Вес  $l_i$  характеризует степень значимости  $i$ -го параметра жилья для лица МГН.

В результате проведенного мониторинга жилья на данной территории, где проживают лица МГН, на предмет соответствия его нормативным параметрам определяются фактические значения параметров  $t$  для каждого ( $k$ -го) жилья:  $t_{ki}$  ( $k = 1, 2, \dots, M, i = 1, 2, \dots, p$ ).

Сравнением опытных параметров с нормативными вычисляется их отношение:

$$\lambda_{ki} = \frac{t_{ki}}{t_i^H},$$

которое показывает степень близости фактического значения параметра  $k$ -го жилья к нормативному значению. Эта характеристика жилья изменяется от 0 (полное несоответствие жилья  $i$ -му параметру) до 1 (жилье полностью соответствует  $i$ -му параметру). Если норматив задается в виде неравенства, то характеристика  $\lambda_{ki}$  принимается равной 1, если фактический параметр удовлетворяет этому неравенству. Например,  $t_1^H \geq 2\text{м}$ ,  $t_1 = 3$ , тогда  $\lambda_{k1} = 1$  или  $t_2^H \leq 2\text{м}$ ,  $t_2 = 1,5$ , тогда  $\lambda_{k2} = 1$ .

Если требования к  $i$ -му параметру качественное (да / нет), то  $\lambda_{ki} = 0$ , если  $t_i$  и  $t_i^H$  противоположны по смыслу, и  $\lambda_{ki} = 1$ , если  $t_i$  и  $t_i^H$  одинаковы по смыслу.

Доступность  $k$ -го жилья для лиц МГН определим как сумму произведений меры удовлетворения каждому параметру  $\lambda_{ki}$  на его вес  $l_i$ , т.е.:

$$\eta_k = \sum_{i=1}^p l_i \lambda_{ki}, \quad (2)$$

где  $\eta_k$  – оценочный показатель доступности  $k$ -го жилья, где проживают лица МГН.

Из выражения (2) следует, что жилье, где полностью выполнены все требования к параметрам ( $\lambda_{ki} = 1$ ), получит значение показателя  $\eta_k$ , равное 1, при волнении требований к весам  $l_i$ :

$$\sum_{i=1}^p l_i = 1. \quad (3)$$

Доступность составляющей «Жилье» функции «Жизнеобеспечение» для лиц МГН на данной территории определим как среднюю доступность этой составляющей среди  $M$  единиц жилья на территории:

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^M \eta_k}{M} = \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^p l_i \lambda_{ki}}{M}. \quad (4)$$

Параметр  $\eta$  изменяется от 0 (нет жилья, удовлетворяющего всем, без исключения, параметрам) до 1 (все  $M$  жилых помещений полностью удовлетворяют всем  $p$  нормативным параметрам). Пусть  $k$ -ое жилье, где проживают  $n_k$  лиц МГН, имеет показатель доступности  $\eta_k$ . Это означает, что для этой группы (может быть один человек, т.е.  $n_k = 1$ ) лиц МГН доступность жилья реализуется в степени  $\eta_k$ , т.е. показатель реализуемости  $\xi_k$  составляющей «Жилье» функции «Жизнеобеспечение» для данной группы лиц МГН в данном  $k$ -ом жилье:

$$\xi_k = \eta_k n_k. \quad (5)$$

Определи показатель  $\xi$  реализуемости лицами МГН составляющей «Жилье» функции «Жизнеобеспечение» на данной территории как величину суммарного показателя  $\sum_{k=1}^M \xi_k$ , приходящегося на одного лица МГН:

$$\xi = \frac{\sum_{k=1}^M \xi_k}{\sum_{k=1}^M n_k} = \frac{\sum_{k=1}^M \eta_k n_k}{N}. \quad (6)$$

Показатель  $\xi$  изменяется от 0 (все  $\eta_k = 0$ ) до 1 (все жилье доступно по всем параметрам всем лицам МГН).

### Пример

Обследуется  $k$ -ая квартира, где проживают  $n_k$  лиц МГН. Требования к жилью нормирующими документами установлены в виде:

1 параметр – ширина прохода  $\geq 5$  м,  $t_1^n \geq 5$  м ;

2 параметр – угол наклона пандуса  $\leq 10^\circ$ ,  $t_2^n \leq 10^\circ$  ;

3 параметр – наличие лифта,  $t_3^n$  – да.

Эксперты присвоили этим параметрам следующие веса:

1 параметр –  $l_1 = 0,2$  ;

2 параметр –  $l_1 = 0,5$ ;  $\sum_{i=1}^3 l_i = 0,2 + 0,5 + 0,3 = 1$  ;

3 параметр –  $l_3 = 0,3$  .

В результате обследования этой квартиры установлено:

1 параметр –  $t_{k1} = 4$  м ;

2 параметр –  $t_{k2} = 9^\circ$  ;

3 параметр –  $t_{k3}$  – да (есть лифт).

Следовательно  $\lambda_{k1} = \frac{4}{5} = 0,8$ ;  $\lambda_{k2} = 1$  (т.к.  $t_{k2} < 10^\circ$ ), (т.к.  $t_{k3}$  – да).

Рассчитываем показатель  $\eta_k$  :

$$\eta_k = \sum_1^3 l_i \lambda_{ki} = 0,2 \cdot 0,8 + 0,5 \cdot 1 + 0,3 \cdot 1 = 0,96.$$

Вариант: все показатели те же, но нет лифта  $\lambda_{k3} = 0$ , тогда:

$$\eta_k = \sum_1^3 l_i \lambda_{ki} = 0,2 \cdot 0,8 + 0,5 \cdot 1 + 0,3 \cdot 0 = 0,66.$$

Результат обследования  $k$ -ой квартиры можно свести в таблицу.

Таблица 1 – Расчет показателя доступности  $\eta_k$   $k$ -го жилья

№ п/п	Параметр жилья	Вес параметра $l_i$	Нормативное значение параметра $t_i^H$	Фактическое значение параметра $t_{ki}$	Мера удовлетворения параметра $\lambda_{ki}$	(3)×(6)
1	Ширина прохода	0,2	$\geq 5$ м	4м	0,8	0,16
2	Угол наклона	0,5	$\leq 10^\circ$	$9^\circ$	1	0,5
3	Наличие лифта	0,3	да	да	1	0,3
$\Sigma$		1				0,96

Показатель  $\eta$  для данной территории рассчитывается по формуле (6) с учетом расчетов по каждому жилью. Расчет показателя реализуемости  $\xi$  сведем в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчет показателя реализуемости жилья на данной территории

№ жилья $k$	Количество МГН, проживающих в жилье $n_k$	Показатель $\eta_k$ для данного жилья	(2)×(3)	$\xi$
1	2	0,96	1,92	$\frac{3,58}{7} = 0,51$
2	1	0,66	0,66	
3	4	0,25	1,00	
$\Sigma$	7		3,58	

Работа выполнена в рамках государственного задания номер 7.1694.2011.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Викторова, Л.А. Обеспечение безопасности и комфортности среды жизнедеятельности в строительных нормах [Текст] / Л.А. Викторова // Архитектура и строительство России. – 2011. – №12. – С. 28-39.
2. Ильичев, В.А. Предложения к проекту доктрины градостроительства и расселения (стратегического планирования городов – city-planning) [Текст] / В.А. Ильичев, А.М. Каримов, В.И. Колчунов, В.В. Алексашина, Н.В. Бакаева, С.А. Кобелева // Жилищное строительство. – 2012. – №1. – С. 2-10.
3. СНиП 35-01-2001. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения [Текст].

**Колчунов Виталий Иванович**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции и материалы»  
E-mail: skimkafedra@yandex.ru  
Тел.: +7 (4862) 73-43-49

**Брума Екатерина Владимировна**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
Тел.: +7 (4862) 73-43-49

---

KOLCHUNOV V.I., BRUMA E.V.

**PROPOSALS FOR A QUANTITATIVE EVALUATION  
OF ELEMENTS OF URBAN ENVIRONMENT NEEDS  
LIMITED MOBILITY GROUPS**

*Proposed indicators to measure accessibility and feasibility of the infrastructure of the urban environment for people with limited mobility.*

*Keywords: people with limited mobility, the rate of accessibility, the rate of realizability.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Viktorova, L.A. Obespechenie bezopasnosti i komfortnosti sredy zhiznedejatel'nosti v stroitel'nyh normah [Tekst] / L.A. Viktorova // Arhitektura i stroitel'stvo Rossii. – 2011. – №12. – S. 28-39.
2. Il'ichev, V.A. Predlozhenija k proektu doktriny gradostrojtstva i rasselenija (strategicheskogo planirovanija gorodov – city-planning) [Tekst] / V.A. Il'ichev, A.M. Karimov, V.I. Kolchunov, V.V. Aleksashina, N.V. Bakaeva, S.A. Kobeleva // Zhiliwnoe stroitel'stvo. – 2012. – №1. – S. 2-10.
3. SNiP 35-01-2001. Dostupnost' zdaniy i sooruzhenij dlja malomobil'nyh grupp naselenija [Tekst].

**Kolchunov Vitalij Ivanovich**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Doctor of technical sciences, professor, head of department «Construction structures and materials»  
E-mail: skimkafedra@yandex.ru  
Ph.: +7 (4862) 73-43-49

**Bruma Ekaterina Vladimirovna**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Post-graduate student of department «Construction structures and materials»  
Ph.: +7 (4862) 73-43-49

## **НОВЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ЦЕНТРАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СОВМЕЩЕННОЙ НАГРУЗКИ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В ВОДЯНЫХ СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

*В статье известная задача решается в рамках нового подхода. Ранее решение данной задачи было выполнено с использованием уравнения характеристики подогревателей горячего водоснабжения. В нашем случае задача решается с использованием традиционного уравнения теплового баланса, которое записывается как для первой (нижней), так и для второй (верхней) ступени подогревателей. С помощью уравнения теплового баланса определяются перепады температуры сетевой воды на обеих ступенях подогревателей. При этом решение задачи в рамках нового подхода стало возможным в результате выявления и математического описания законов изменения в течение отопительного периода расходов сетевой воды, циркулирующей через обе ступени подогревателей, а также тепловых потоков, передаваемых в этих ступенях нагреваемой воде.*

**Ключевые слова:** система теплоснабжения, подогреватели горячего водоснабжения, центральное регулирование, нагрузка отопления, нагрузка горячего водоснабжения, совмещенная нагрузка, тепловой поток, уравнение теплового баланса, перепад температуры сетевой воды, доля нагрузки горячего водоснабжения.

Целью решения задачи центрального регулирования отпускаемого теплового потока в водяных системах централизованного теплоснабжения (СЦТ) является, как известно, математическое описание функциональных зависимостей вида:

$$\tau_1 = f(t_n); \quad (1.1)$$

$$\tau_2 = f(t_i), \quad (1.2)$$

где  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  – температуры сетевой воды, соответственно, в подающем и обратном трубопроводах тепловой сети, °С;  $t_n$  – температура наружного воздуха, °С.

При центральном регулировании отпуска теплоты в рамках отопительного периода при наличии нагрузки горячего водоснабжения выделяется два диапазона значений температуры наружного воздуха [1, 2]:

$$\text{а) } t_n = t_{нн} \dots t_{ни}; \quad (2.1)$$

$$\text{б) } t_n = t_{ни} \dots t_{но}, \quad (2.2)$$

где  $t_{нн}$ ,  $t_{ни}$ ,  $t_{но}$  – характерные значения температуры наружного воздуха, соответствующие началу (концу) отопительного периода, точке излома температурного графика, расчетное значение для проектирования отопления.

При этом в диапазоне значений температуры наружного воздуха,  $t_i = t_{ни} \dots t_{но}$  применяется качественное регулирование отпускаемого теплового потока.

Решение задачи центрального регулирования отпуска теплоты в водяных СЦТ, осуществляемого по закону изменения отопительной нагрузки, представлено, например, в [1-3]. В [1, 2] данная задача решена с использованием уравнения характеристики теплообменного аппарата, а в [3] – с использованием традиционного уравнения теплопередачи.

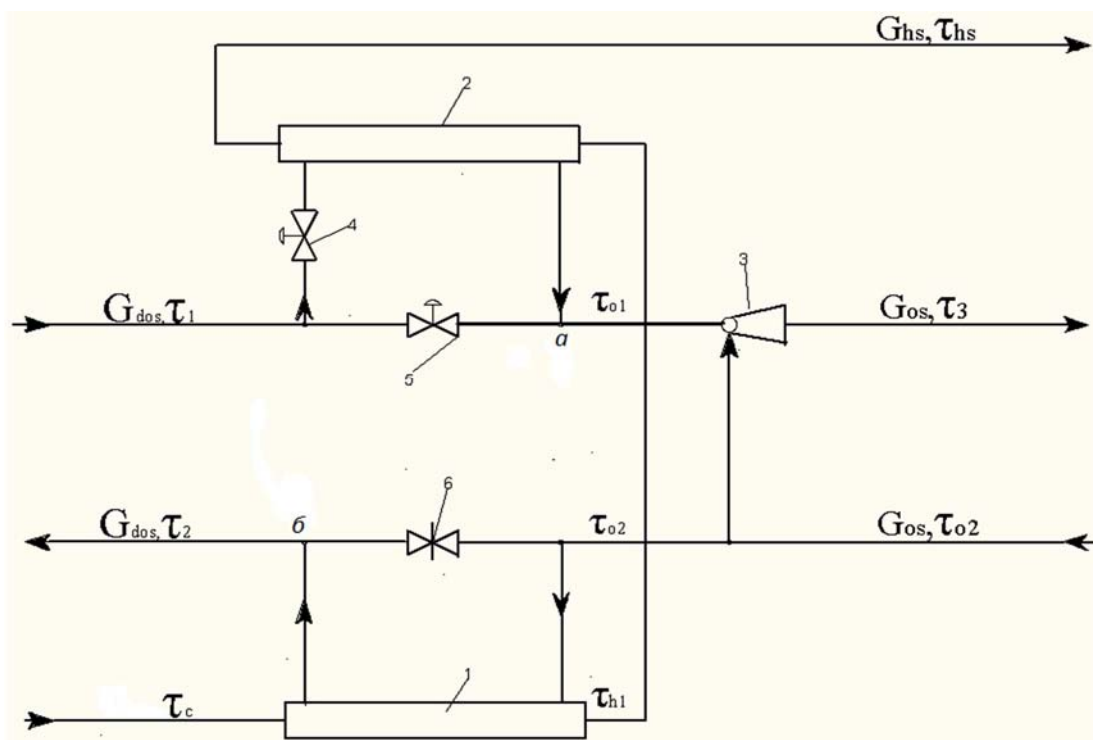
Совмещение тепловых нагрузок отопления и горячего водоснабжения позволяет уменьшить расчетный расход воды в тепловой сети, т.к. в этом случае расход сетевой воды на горячее водоснабжение не предусматривается [1, 2].

Нагрузка горячего водоснабжения при ее совмещении с нагрузкой отопления в закрытых водяных СЦТ обеспечивается за счет некоторого повышения температуры  $\tau_1$  сетевой воды в подающей магистрали и некоторого снижения ее температуры  $\tau_2$  в обратной магистрали тепловой сети. Соответственно, центральное регулирование совмещенной нагрузки осуществляется по так называемому повышенному (скорректированному) температурному графику [1, 2].

Решение задачи центрального регулирования отпуска теплоты в закрытых водяных СЦТ, осуществляемого по закону изменения совмещенной нагрузки, представлено, например, в [1, 2]. Данная задача в [1, 2] решена на основе уравнения характеристики подогревателей горячего водоснабжения.

В предлагаемой статье решение данной задачи проводится с использованием традиционного уравнения теплового баланса.

Совмещение тепловых нагрузок отопления и горячего водоснабжения в закрытых СЦТ реализуется с использованием двухступенчатой последовательной схемы присоединения подогревателей горячего водоснабжения (рис. 1) [1, 2].



*Рисунок 1 – Двухступенчатая последовательная схема присоединения водоподогревателей горячего водоснабжения: 1 – первая (нижняя) ступень водоподогревателей; 2 – вторая (верхняя) ступень водоподогревателей; 3 – водоструйный элеватор; 4 – регулятор температуры нагреваемой воды на горячее водоснабжение; 5 – регулятор расхода; 6 – задвижка, нормально закрытая*

В этом случае расчетная тепловая нагрузка горячего водоснабжения  $Q_{hs}$  представляется следующим образом:

$$Q_{hs} = Q_{h1} + Q_{h2}, \quad (3)$$

где  $Q_{h1}$ ,  $Q_{h2}$  – тепловые потоки, передаваемые от греющей сетевой воды к нагреваемой водопроводной воде, соответственно, в первой (нижней) и второй (верхней) ступенях подогревателей, Вт.



Расчетная тепловая нагрузка горячего водоснабжения  $Q_{hs}$  в течение отопительного периода имеет постоянное значение, а значения тепловых потоков  $Q_{h1}$  и  $Q_{h2}$  с изменением температуры наружного воздуха определенным образом при этом изменяются, т.е. имеем:

$$Q_{hs} = const; \quad (4.1)$$

$$Q_{h1} = f(t_n) \text{ и } Q_{h2} = f(t_n). \quad (4.2)$$

Тепловые потоки  $Q_{h1}$  и  $Q_{h2}$  определяются известным образом:

$$Q_{h1} = cG_{d1}\delta_{1p} = cG_{hs}(\tau_{h1} - \tau_c); \quad (5.1)$$

$$Q_{h2} = cG_{d2}\delta_{2p} = cG_{hs}(\tau_{hs} - \tau_{h1}), \quad (5.2)$$

где  $c$  – теплоемкость воды, Дж/(кг °С);  $G_{d1}$  и  $G_{d2}$  – расходы сетевой воды, циркулирующей, соответственно, через первые (нижние) и вторые (верхние) ступени подогревателей, кг/с;  $G_{hs}$  – расчетный расход нагреваемой воды на горячее водоснабжение, кг/с;  $\tau_c$ ,  $\tau_{h1}$ ,  $\tau_{hs}$  – значения температуры нагреваемой воды, соответственно, холодной водопроводной, после первой (нижней) ступени подогревателей, горячей (расчетное значение), °С;  $\delta_{1p}$ ,  $\delta_{2p}$  – перепады температур сетевой воды, соответственно, на первых (нижних) и вторых (верхних) ступенях подогревателей, °С.

В качестве греющего теплоносителя через первую (нижнюю) ступень подогревателя пропускается вся обратная сетевая вода и, следовательно, в уравнении (5.1) имеем:

$$G_{d1} = G_{dos}, \quad (6)$$

где  $G_{dos}$  – расчетный расход сетевой воды на отопление, кг/с.

Расчетный расход сетевой воды на отопление в диапазоне значений температуры наружного воздуха,  $t_n = t_{ни} \dots t_{но}$  имеет постоянное значение и определяется известным образом:

$$G_{dos} = \frac{Q_{oma\delta}}{c\Delta\tau_{dos}}, \quad (7)$$

где  $Q_{oma\delta}$  – максимальный (расчетный) тепловой поток на отопление при  $t_n = t_{но}$ , Вт;  $\Delta\tau_{dos} = \tau_{o1s} - \tau_{o2s}$ ;  $\tau_{i1s}$ ,  $\tau_{i2s}$  – расчетные температуры сетевой воды, соответственно, до систем водяного отопления и после них, °С.

Соответственно, изменение теплового потока  $Q_{h1}$  в диапазоне значений температуры  $t_n = t_{ни} \dots t_{но}$  обусловлено только изменением температуры  $\tau_{o2}$  обратной сетевой воды. При значении температуры наружного воздуха,  $t_n = t_{но}$  температура  $\tau_{o2} = \tau_{o2s} = 70^\circ\text{C}$  и вся нагрузка горячего водоснабжения обеспечивается только первой (нижней) ступенью подогревателей. В этих условиях прямая сетевая вода во вторую (верхнюю) ступень подогревателей не попадает и она не участвует в подогреве воды на горячее водоснабжение. В итоге при  $t_n = t_{но}$  имеем:

$$\tau_{h1} = \tau_{hs} \text{ и } Q_{h1} = Q_{hs}; \quad (8.1)$$

$$G_{d2} = 0 \text{ и } Q_{h2} = 0. \quad (8.2)$$

С ростом температуры наружного воздуха  $t_n$  температура обратной сетевой воды  $\tau_{o2}$  уменьшается и, соответственно, значение температуры  $\tau_{h1}$  нагреваемой воды после первой ступени подогревателей также уменьшается. Догрев воды на горячее водоснабжение до требуемого значения температуры (до 60°С) осуществляется во второй (верхней) ступени подогре-

вателей. Таким образом, с ростом температуры наружного воздуха  $t_n$  значение теплового потока  $Q_{h1}$  уменьшается, а значение теплового потока  $Q_{h2}$  увеличивается. При этом рост значения теплового потока  $Q_{h2}$  при уменьшении температуры прямой сетевой воды  $\tau_1$  обеспечивается за счет увеличения расхода  $G_{d2}$  этой воды через вторую (верхнюю) ступень подогревателей. Следовательно, в диапазоне значений температуры наружного воздуха,  $t_n = t_{ни} \dots t_{ну}$  имеем:

$$G_{d2} = G_{d1} = G_{dos}; \quad (9.1)$$

$$Q_{h2u} = Q_{h1u} = 0,5 Q_{hs}, \quad (9.2)$$

где  $Q_{h1u}$ ,  $Q_{h2u}$  – значения тепловых потоков  $Q_{h1}$  и  $Q_{h2}$  при температуре наружного воздуха,  $t_n = t_{i\dot{e}}$ .

И так, можно отметить, что в диапазоне значений температуры наружного воздуха,  $t_n = t_{ни} \dots t_{но}$  расход прямой сетевой воды  $G_{d2}$  через вторую (верхнюю) ступень подогревателей изменяется в следующих пределах:  $G_{d2} = G_{dos} \dots 0$ . При этом функциональная зависимость:  $G_{d2} = f(t_n)$  математически описывается с помощью следующего выражения:

$$G_{d2} = \theta_n G_{dos}, \quad (10)$$

где  $\theta_i$  – относительная разность текущего и расчетного значений температуры наружного воздуха (определяется по выражению (11)).

Величина  $\theta_n$  определяется следующим образом:

$$\theta_n = \frac{t_n - t_{но}}{t_{ни} - t_{но}}, \quad (11)$$

где  $t_n$ ,  $t_{ни}$ ,  $t_{но}$  – тоже, что и в выражениях (2.1) и (2.2); здесь и далее значение  $t_n = t_{ни}$  принимается применительно к повышенному (скорректированному) температурному графику.

Чтобы получить математические выражения зависимостей (1.1) и (1.2), запишем для точек слияния потоков сетевой воды после второй и первой ступеней подогревателей горячего водоснабжения (точки «а» и «б» на рис. 1) уравнения тепловых балансов:

$$G_{d2} (\tau_1 - \delta_{2p}) + (G_{dos} - G_{d2})\tau_1 = G_{dos} \tau_{i1};$$

$$G_{d1} (\tau_{o2} - \delta_{1p}) + (G_{dos} - G_{d1})\tau_{o2} = G_{dos} \tau_2$$

и решив их, имеем:

$$\tau_1 = \tau_{o1} + \frac{G_{d2}}{G_{dos}} \delta_{2p} = \tau_{o1} + \delta_2; \quad (12.1)$$

$$\tau_2 = \tau_{o2} - \frac{G_{d1}}{G_{dos}} \delta_{1p} = \tau_{o2} - \delta_1, \quad (12.2)$$

где  $\tau_{o1}$ ,  $\tau_{o2}$  – температуры сетевой воды, соответственно, до систем водяного отопления и после них (после вторых и до первых ступеней подогревателей), °С;  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – перепады температур сетевой воды в точках присоединения к тепловой сети, соответственно, первых (нижних) и вторых (верхних) ступеней подогревателей, °С.

Температуры  $\tau_{o1}$  и  $\tau_{o2}$  в выражениях (12.1) и (12.2) известны и в диапазоне значений  $t_n = t_{ни} \dots t_{но}$  определяются по известным формулам центрального качественного регулирования отопительной нагрузки [1-3]:

$$\tau_{o1} = t_{\dot{a}} + \Delta t_{i\dot{\delta}s} \beta_{qo}^m + (\Delta \tau_{dos} - 0,5 \Delta \tau_{os}) \beta_{qo}; \quad (13.1)$$

$$\tau_{o2} = t_{\dot{a}} + \Delta t_{i\dot{\delta}s} \beta_{qo}^m - 0,5 \Delta \tau_{os} \beta_{qo}, \quad (13.2)$$

где величины те же, что и в [3]; при этом:  $t_{\dot{a}} = 18^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t_{i\dot{\delta}s} = 0,5 (\tau_{3s} + \tau_{o2s}) - t_{\dot{a}} = 0,5 (95 + 70) - 18 = 64,5^\circ\text{C}$ ;  $m = 0,8$ ;  $\Delta \tau_{dos} = \tau_{o1s} - \tau_{o2s} = 150 - 70 = 80^\circ\text{C}$ ;  $\Delta \tau_{os} = \tau_{3s} - \tau_{o2s} = 95 - 70 = 25^\circ\text{C}$ .

Согласно [3], в рамках отопительного периода весьма удовлетворительным приближением к выражениям (13.1) и (13.2) является уравнение прямой следующего вида:

$$\tau_{oi} = 27 + (\tau_{ois} - 27) \beta_{qo} \quad (i=1, 2). \quad (13)$$

Коэффициент пересчета  $\beta_{qo}$  определяется известным образом [3]:

$$\beta_{qo} = \frac{t_{\dot{a}} - t_i}{t_{\dot{a}} - t_{ii}}. \quad (14)$$

Таким образом, решение рассматриваемой задачи сводится к выводу формул для определения текущих значений величин  $\delta_2$  и  $\delta_1$  в выражениях (12.1) и (12.2). При этом из анализа выражений (12.1) и (12.2) следует:

$$\delta_2 = \frac{G_{d2}}{G_{dos}} \delta_{2p}; \quad (15.1)$$

$$\delta_1 = \frac{G_{d1}}{G_{dos}} \delta_{1p}. \quad (15.2)$$

Величины  $\delta_{2p}$  и  $\delta_{1p}$  в выражениях (15.1) и (15.2) определяются известным образом:

$$\delta_{2p} = \frac{Q_{h2}}{cG_{d2}}; \quad (16.1)$$

$$\delta_{1p} = \frac{Q_{h1}}{cG_{d1}}. \quad (16.2)$$

Выражения (15.1) и (15.2) с учетом соотношений (16.1) и (16.2) принимают вид:

$$\delta_2 = \frac{Q_{h2}}{cG_{dos}}; \quad (17.1)$$

$$\delta_1 = \frac{Q_{h1}}{cG_{dos}}. \quad (17.2)$$

Анализ выражений (17.1) и (17.2) показывает, что следующим этапом решения рассматриваемой задачи является обоснование математического описания функциональных зависимостей (4.2).

Разделив левую и правую части равенства (3) на величину  $Q_{hs}$ , имеем:

$$1 = \alpha_1 + \alpha_2, \quad (18)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – доли тепловых нагрузок первой (нижней) и второй (верхней) ступеней подогревателей в суммарной нагрузке горячего водоснабжения.

Соответственно имеем:

$$Q_{h1} = \alpha_1 Q_{hs}; \quad (19.1)$$

$$Q_{h2} = \alpha_2 Q_{hs}, \quad (19.2)$$

где  $Q_{h1}$ ,  $Q_{h2}$ ,  $Q_{hs}$  – тоже, что и в равенстве (3);  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – тоже, что и в равенстве (18).

В конечном счете, решение рассматриваемой задачи сводится к обоснованию математических выражений, описывающих зависимости вида:

$$\alpha_1 = f(t_i); \quad (20.1)$$

$$\alpha_2 = f(t_i). \quad (20.2)$$

Переписав применительно к нагреваемой воде равенство (3) в развернутом виде:

$$cG_{hs}(\tau_{hs} - \tau_c) = cG_{hs}(\tau_{h1} - \tau_c) + cG_{hs}(\tau_{hs} - \tau_{h1}) \quad (21)$$

и разделив его почленно на его левую часть, с учетом выражения (18) можем написать:

$$\alpha_1 = \frac{\tau_{h1} - \tau_c}{\tau_{hs} - \tau_c}; \quad (22.1)$$

$$\alpha_2 = \frac{\tau_{hs} - \tau_{h1}}{\tau_{hs} - \tau_c}, \quad (22.2)$$

где величины те же, что и в выражениях (5.1) и (5.2).

Температура нагреваемой воды  $\tau_{h1}$  после первой (нижней) ступени подогревателей в диапазоне значений температуры наружного воздуха,  $t_n = t_{nu} \dots t_{no}$  изменяется в следующих пределах:  $\tau_{h1} = \tau_{h1u} \dots \tau_{hs}$ . При этом функциональная зависимость:

$$\tau_{h1} = f(t_i) \quad (23)$$

математически описывается с помощью выражения:

$$\tau_{h1} = \tau_{hs} - (\tau_{hs} - \tau_{h1u}) \theta_n, \quad (24)$$

где  $\tau_{h1u}$  – значение температуры  $\tau_{h1}$  при температуре наружного воздуха,  $t_n = t_{ie}$ ;  $t_{nu}$  – то же, что и в выражениях (2.1) и (2.2.) применительно к повышенному температурному графику.

Принимая во внимание выражение (9.2), запишем равенство:

$$\tau_{h1u} - \tau_c = \tau_{hs} - \tau_{h1u},$$

решение которого дает:

$$\tau_{h1u} = 0,5(\tau_c + \tau_{hs}). \quad (25)$$

Принимая  $\tau_c = 5^\circ\text{C}$  и  $\tau_{hs} = 60^\circ\text{C}$ , из выражения (25) следует, что  $\tau_{h1u} = 32,5^\circ\text{C}$ .

С учетом соотношения (24), выражения (22.1) и (22.2) принимают вид:

$$\alpha_1 = 1 - (1 - \alpha_{1u}) \theta_n = 1 - \alpha_{2u} \theta_n; \quad (26.1)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{2u} \theta_n, \quad (26.2)$$

где  $\alpha_{1u} = \frac{\tau_{h1u} - \tau_c}{\tau_{hs} - \tau_c}; \quad (27.1)$

$$\alpha_{2u} = \frac{\tau_{hs} - \tau_{h1u}}{\tau_{hs} - \tau_c}. \quad (27.2)$$

Решая совместно уравнения (27.1) и (27.2) с уравнением (25), имеем:

$$\alpha_{1u} = \alpha_{2u} = 0,5. \quad (28)$$

Принимая во внимание выражения (17.1), (17.2) и (3), общий перепад температуры  $\delta$  сетевой воды в обеих ступенях подогревателей определяется следующим образом:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \frac{Q_{hs}}{cG_{dos}} \quad (\delta = const), \quad (29)$$

где  $Q_{hs}$  – то же, что и в выражении (3);  $c$  – то же, что и в выражениях (5.1) и (5.2);  $G_{dos}$  – то же, что и по выражению (7).

С учетом выражения (7) формула (29) приобретает известный вид [1]:

$$\delta = \rho_h \Delta \tau_{dos}, \quad (30)$$

где  $\rho_h$  – относительная нагрузка горячего водоснабжения [1];

$$\rho_h = \frac{Q_{hs}}{Q_{oma\delta}}; \quad (31)$$

$\Delta \tau_{dos}$ ,  $Q_{oma\delta}$  – то же, что и в выражении (7);  $Q_{hs}$  – то же, что и в выражениях (3) и (4.1).  
Анализируя совместно выражения (19.1) и (19.2), (17.1) и (17.2), (29), имеем:

$$\delta_1 = \alpha_1 \delta; \quad (32.1)$$

$$\delta_2 = \alpha_2 \delta, \quad (32.2)$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – то же, что и по выражениям (26.1) и (26.2);  $\delta$  – то же, что и по выражению (29) или (30).

Анализируя совместно выражения (11), (26.1) и (26.2), (28), (32.1) и (32.2), имеем:

$$t_n = t_{nu} : \theta_n = 1, \delta_1 = \delta_2 = 0,5 \delta; \quad (33.1)$$

$$t_n = t_{no} : \theta_n = 0, \delta_1 = \delta, \delta_2 = 0. \quad (33.2)$$

Температура наружного воздуха  $t_{nu}$ , при которой наблюдается излом повышенного температурного графика, определяется в результате решения уравнения (13.1) при подстановке в него значения температуры  $\tau_{ol} = \tau_{olu}$ . При этом с учетом выражений (12.1) и (33.1) можно написать:

$$\tau_{olu} = \tau_{1u} - 0,5 \delta, \quad (34)$$

где  $\tau_{1u}$  – значение температуры  $\tau_1$  сетевой воды в подающем трубопроводе тепловой сети при температуре  $t_n = t_{nu}$  ( $\tau_{1u} = 70$  °С);  $\delta$  – то же, что и по выражению (30).

Уравнение (13.1) относительно температуры  $t_{nu}$  решается только лишь методом последовательного приближения. В качестве его первого решения может быть использовано решение уравнения (13) [3]:

$$t_{nu}^* = t_{\hat{a}} - \frac{\tau_{olu} - 27}{\tau_{ols} - 27} (t_{\hat{a}} - t_{i\hat{i}}), \quad (35)$$

где  $t_{\hat{a}}$  – то же, что и в уравнении (13.1);  $\tau_{olu}$  – то же, что и по выражению (34);  $\tau_{ols}$  – то же, что и в выражении (7);  $t_{no}$  – то же, что и в выражении (2.2).

### Пример расчета

Построить скорректированный (повышенный) температурный график, предварительно определив несколько значений величин  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Значения величин  $\delta_1$  и  $\delta_2$  определить при трех значениях температуры наружного воздуха:  $t_{i\hat{e}}$ ,  $-25$  °С,  $t_{i\hat{o}}$ .

Дано:  $t_{\hat{a}} = 18$  °С,  $t_{no} = -45$  °С,  $\tau_{1s} = \tau_{i1s} = 150$  °С,  $\tau_{i2s} = 70$  °С,  $Q_{hs} = 6,4$  МВт,  $Q_{oma\delta} = 22$  МВт.

Решение:

1. Определяем по выражениям (31), (30) и (34), соответственно, величины  $\rho_h$ ,  $\delta$  и  $\tau_{olu}$ :

$$\rho_h = \frac{6,4}{22} = 0,291; \delta = 0,291 \times (150 - 70) = 23,3^\circ\text{C}; \tau_{olu} = 70 - 0,5 \times 23,3 = 58,4^\circ\text{C}.$$

2. По выражению (14) для значений температуры  $t_n = 1,9, 1,2, -25, -45^\circ\text{C}$  определяем, соответственно, значения коэффициента  $\beta_{qo}$ :

$$\beta_{qo} = \frac{16,1}{63} = 0,255; \beta_{qo} = \frac{16,8}{63} = 0,267; \beta_{qo} = \frac{43}{63} = 0,683; \beta_{qo} = 1.$$

3. Выражение (35) дает:

$$t_{nu}^* = 18 - \frac{58,4 - 27}{150 - 27} (18 + 45) = 1,9^\circ\text{C}.$$

При  $t_{nu}^* = 1,9^\circ\text{C}$  из выражения (13.1) имеем:

$$\tau_{i1e}^* = 18 + 64,5 \times 0,255^{0,8} + (80 - 0,5 \times 25) \times 0,255 = 56,9^\circ\text{C}.$$

Учитывая, что  $\tau_{i1e} > \tau_{i1e}^*$ , уменьшаем значение температуры  $t_{i\epsilon}$ , принимая  $t_{i\epsilon} = 1,2^\circ\text{C}$ ; в этом случае уравнение (13.1) дает:  $\tau_{i1e}^* = 58,4^\circ\text{C}$ .

И так, имеем:  $t_{nu} = 1,2^\circ\text{C}$ .

4. Принимая во внимание выражения (11), (26.1) и (26.2), (32.1) и (32.2), имеем:

$$t_n = 1,2^\circ\text{C}: \theta_n = 1; \alpha_2 = \alpha_{2u} = 0,5; \alpha_1 = 1 - 0,5 = 0,5;$$

$$\delta_2 = 0,5 \times 23,3 = 11,6^\circ\text{C}; \delta_1 = 0,5 \times 23,3 = 11,6^\circ\text{C}.$$

$$t_n = -25^\circ\text{C}: \theta_n = \frac{-25 + 45}{1,2 + 45} = 0,433;$$

$$\alpha_2 = 0,5 \times 0,433 = 0,216; \alpha_1 = 1 - \alpha_2 = 1 - 0,216 = 0,784;$$

$$\delta_2 = 0,216 \times 23,3 = 5^\circ\text{C}; \delta_1 = 0,784 \times 23,3 = 18,3^\circ\text{C}.$$

$$t_n = -45^\circ\text{C}: \theta_n = 0; \alpha_2 = 0; \delta_2 = 0^\circ\text{C}; \alpha_1 = 1; \delta_1 = 23,3^\circ\text{C}.$$

5. Формулы (13.1) и (13.2) дают:

$$t_n = 1,2^\circ\text{C}: \tau_{i1} = 18 + 64,5 \times 0,267^{0,8} + (80 - 0,5 \times 25) \times 0,267 = 58,4^\circ\text{C};$$

$$\tau_{i2} = 18 + 64,5 \times 0,267^{0,8} - 0,5 \times 25 \times 0,267 = 37,1^\circ\text{C}.$$

$$t_n = -25^\circ\text{C}: \tau_{i1} = 18 + 64,5 \times 0,683^{0,8} + (80 - 0,5 \times 25) \times 0,683 = 111,6^\circ\text{C};$$

$$\tau_{i2} = 18 + 64,5 \times 0,683^{0,8} - 0,5 \times 25 \times 0,683 = 57,0^\circ\text{C}.$$

$$t_n = -45^\circ\text{C}: \tau_{o1} = 150^\circ\text{C}; \tau_{o2} = 70^\circ\text{C}.$$

6. С учетом выражений (12.1) и (12.2) имеем:

$$t_n = 1,2^\circ\text{C}: \tau_1 = 58,4 + 11,6 = 70^\circ\text{C};$$

$$\tau_2 = 37,1 - 11,6 = 25,5^\circ\text{C}.$$

$$t_n = -25^\circ\text{C}: \tau_1 = 111,6 + 5 = 116,6^\circ\text{C};$$

$$\tau_2 = 57 - 18,3 = 38,7^\circ\text{C}.$$

$$t_n = -45^\circ\text{C}: \tau_1 = 150 + 0 = 150^\circ\text{C};$$

$$\tau_2 = 70 - 23,3 = 46,7^\circ\text{C}.$$

7. С использованием выражений (24) и (25) определяем значение температуры  $\tau_{h1}$  нагреваемой воды после первой (нижней) ступени подогревателей:

$$t_n = 1,2^\circ\text{C}: \tau_{h1} = \tau_{hlu} = 0,5 \times (5 + 60) = 32,5^\circ\text{C};$$

$$t_n = -25^\circ\text{C}: \tau_{h1} = 60 - (60 - 32,5) \times 0,433 = 48,1^\circ\text{C};$$

$$t_n = -45^\circ\text{C}: \tau_{h1} = 60 - (60 - 32,5) \times 0 = 60^\circ\text{C}.$$

8. Расчетный расход сетевой воды на отопление, определяемый по выражению (7), составляет:  $G_{dos} = \frac{22 \times 10^6}{4190 \times (150 - 70)} = 65,6 \text{ кг/с}.$

Результаты выполненного расчета представлены в виде графиков на рисунке 2.

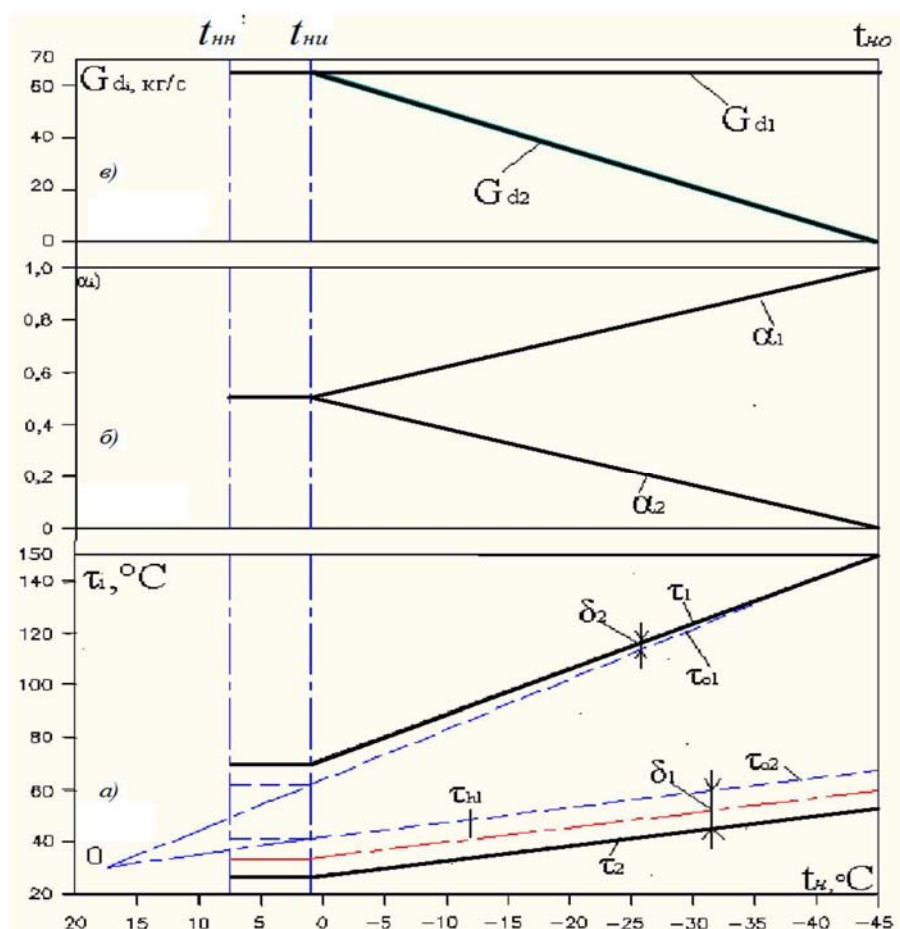


Рисунок 2 – Графики зависимостей: а)  $\tau_1 = f(t_i)$  и  $\tau_2 = f(t_i)$  (повышенный температурный график),  $\tau_{i1} = f(t_i)$  и  $\tau_{i2} = f(t_i)$  (отопительно-бытовой температурный график),  $\tau_{h1} = f(t_i)$ ; б)  $\alpha_1 = f(t_i)$  и  $\alpha_2 = f(t_i)$ ; в)  $G_{d1} = G_{dos} = const$  и  $G_{d2} = f(t_i)$ ; точка «о» (+18°C; +27°C) – начальная точка графиков выражения (13)

### Выводы

1. Отмечено, что совмещение в закрытых водяных СЦТ тепловых нагрузок отопления и горячего водоснабжения реализуется с использованием двухступенчатой последовательной схемы присоединения подогревателей. Соответственно, центральное регулирование совмещенной нагрузки проводится по так называемому скорректированному (повышенному) температурному графику.

При этом в настоящее время задача центрального регулирования совмещенной нагрузки в закрытых СЦТ решена на основе уравнения характеристики подогревателей.

2. В статье решение данной задачи проведено с использованием традиционного уравнения теплового баланса, которое записано для каждой ступени подогревателей. В результате решения уравнений тепловых балансов получены выражения (12.1) и (12.2) для определения температуры сетевой воды по повышенному температурному графику. При этом перепады температуры  $\delta_1$  и  $\delta_2$  сетевой воды на первой и второй ступенях подогревателей определяются известным образом с использованием соотношений (17.1) и (17.2).

3. Из анализа соотношений (17.1) и (17.2) получено, что решение рассматриваемой задачи сводится к установлению и описанию законов изменения в течение отопительного периода тепловых потоков  $Q_{h1}$  и  $Q_{h2}$ , передаваемых в первой и второй ступенях подогревателей.

4. Соответственно, установлены законы изменения расходов сетевой воды через первую и вторую ступени подогревателей, описываемые выражениями (6) и (10).

5. Введены такие величины как доли  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  тепловых потоков  $Q_{h1}$  и  $Q_{h2}$  в общей тепловой нагрузке горячего водоснабжения  $Q_{hs}$ , определяемые выражениями (22.1) и (22.2).

6. Установлен закон изменения в течение отопительного периода температуры нагреваемой воды после первой ступени подогревателей, описываемый выражением (24).

7. Используя выражение (24), получены формулы (26.1) и (26.2), описывающие законы изменения в течение отопительного периода долей  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Принимая во внимание соотношения (19.1) и (19.2), можно отметить, что с помощью формул (26.1) и (26.2) обеспечивается математическое описание законов изменения, собственно, тепловых потоков  $Q_{h1}$  и  $Q_{h2}$ .

8. Используя формулы (26.1) и (26.2), получены расчетные выражения (32.1) и (32.2) для определения перепадов температуры  $\delta_1$  и  $\delta_2$  сетевой воды на первой и второй ступенях подогревателей.

9. Предложена методика определения температуры наружного воздуха  $t_{ни}$  в точке излома повышенного температурного графика, базирующаяся на основе совместного решения уравнений (34) и (13.1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети [Текст]: Учебник для вузов / Е.Я. Соколов. – 8-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 472 с.
2. Теплоснабжение [Текст]: Учебник для вузов / А.А. Ионин, Б.М. Братенков, Е.Н. Терлецкая; Под ред. А.А. Ионина. – М.: Стройиздат 1982. – 336 с.
3. Горшенин, В.П. Анализ методов решения задачи центрального качественного регулирования отпуска теплоты в водяных системах централизованного теплоснабжения [Текст] / В.П. Горшенин // Строительство и реконструкция. – 2011. – №5. – С. 8-14.

### Горшенин Владимир Петрович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство»  
Тел.: +7 (4862) 43-26-30; +7 (960) 643-47-41

GORSHENIN V.P.

## NEW APPROACH TO THE PROBLEM SOLUTION OF CENTRAL CONTROLLING OF SIMULTANEOUS DEMAND OF HEATING AND HOT WATER SUPPLY IN WATER SYSTEMS OF DISTRICT HEAT SUPPLY



*The article gives the solution of well-known problem within the new approach. Earlier the problem was solved by equation of heater characteristic of hot water supply. In our case the problem is solved by using a conventional heat balance equation, which is written for the first (lower stage) and for the second (upper stage) stage of heaters. Heat balance equation is used to define temperature gradients of heating water on both stages of heaters. At the same time the problem solution applying the new method is possible due to finding out and mathematic description of the laws of variation in the course of heating period of heating water expenditures which circulates through both stages of heaters and also heat flows being transferred in these stages of the heated water*

**Keywords:** *heat supply system, hot water supply heaters, central controlling, heating loading, hot water supply loading, simultaneous demand, heat flow, heat balance equation, temperature gradient of heating water, degree of loading of hot water supply, relative loading of hot water supply.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Sokolov, E.Ja. Teplofikacija i teplovye seti [Tekst]: Uchebnik dlja vuzov / E.Ja. Sokolov. – 8-e izd., stereot. – M.: Izdatel'skij dom MJeI, 2006. – 472 s.
2. Teplosnabzhenie [Tekst]: Uchebnik dlja vuzov / A.A. Ionin, B.M. Bratenkov, E.N. Terleckaja; Pod red. A.A. Ionina. – M.: Strojizdat 1982. – 336 s.
3. Gorshenin, V.P. Analiz metodov reshenija zadachi central'nogo kachestvennogo regulirovanija otpuska teploty v vodjanyh sistemah centralizovannogo teplosnabzhenija [Tekst] / V.P. Gorshenin // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – 2011. – №5. – S. 8-14.

### **Gorshenin Vladimir Petrovich**

State university – educational-science-production complex, Orel

Candidate of technical sciences, lecturer assistant of department «Urban development and economy»

Tel.: +7 (4862) 43 26 30; +7 (960) 643 47 41

КОЛПАКОВ А.В., АБДРАХИМОВ В.З.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВСПУЧИВАНИЯ И ФАЗОВОГО СОСТАВА НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ОБЖИГА КЕРАМЗИТА ИЗ МЕЖСЛАНЦЕВОЙ И БЕЙДЕЛЛИТОВОЙ ГЛИНЫ

*Исследования показали, что лучше вспучивается межсланцевая монтмориллонитовая глина по отношению к бейделлитовой. В результате проведенных исследований установлены особенности фазовых превращений при обжиге легкоплавких глин с различными химико-минералогическими составами. Установлено, что в бейделлитовой глине и межсланцевой глине появление жидкой фазы отмечается при температуре 950°C, кристобалита при 1050°C, а интенсивная кристаллизация муллита – при 1100-1150°C.*

**Ключевые слова:** керамзит, межсланцевая глина, бейделлит, обжиг, коэффициент вспучивания, рентгенофазовый анализ, ИК-спектроскопический, фазовый состав, кристобалит, гематит, муллит.

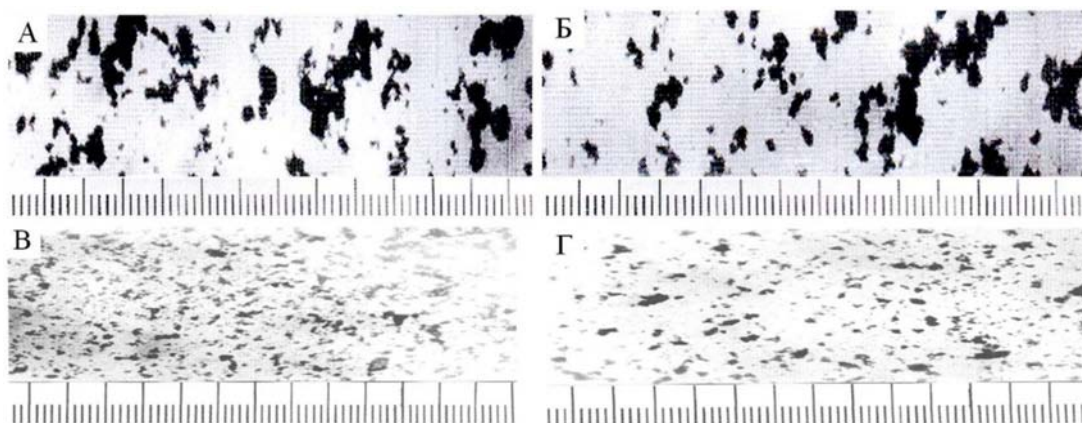
В работах [1, 2] была показана принципиальная возможность использования межсланцевой и бейделлитовой глин в производстве керамических материалов.

Межсланцевая глина образуется при добыче горючих сланцев на сланцеперерабатывающих заводах (на шахтах) и относится к техногенным отходам. По числу пластичности межсланцевая глина относится к высокопластичному глинистому сырью (число пластичности 27-32) с истинной плотностью 2,55-2,62 г/см<sup>3</sup>. Химический состав межсланцевой глины представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав глинистых материалов

Глина	Содержание оксидов						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	п.п.п.
Межсланцевая	45-47	13-14	5-6	11-13	2-3	3-4	9-20
Бейделлитовая	54,38	19,46	8,52	1,75	1,82	2,73	8,42

Для анализа размера частиц исследуемой межсланцевой глины был проведен металлографический анализ на микроскопе МИН-8 М при увеличении в 200 раз (рис. 1).



**Рисунок 1 – Металлографический анализ глинистых материалов: А, Б – межсланцевого; В, Г – бейделлитового**

Как видно из рисунка 1 в образцах много крупных включений (размером более 2-5 мкм). Микроструктура межсланцевой глины представлена на рисунке 2.

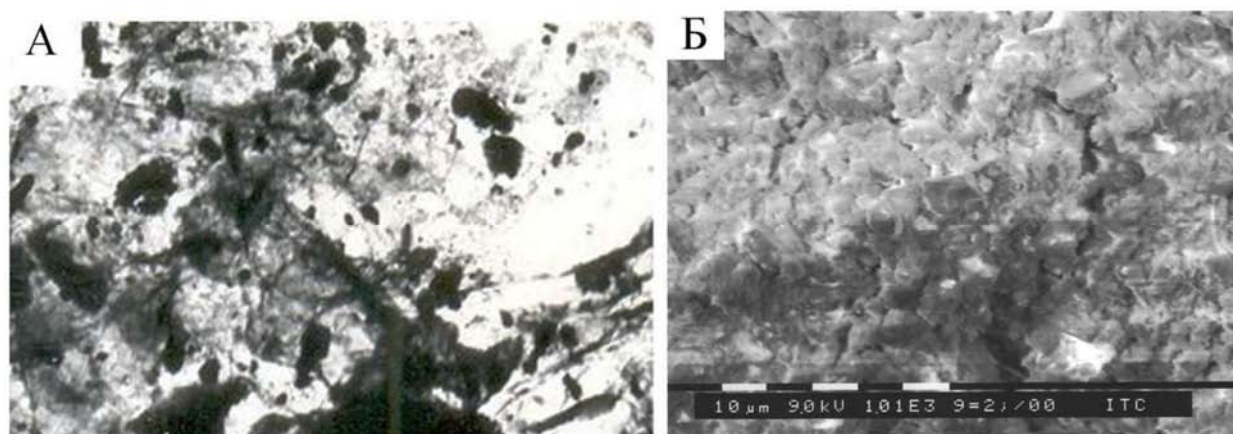


Рисунок 2 – Микроструктура глинистых материалов: А – межсланцевой глины  
Б – бейделлитовой. Увеличение: А –  $\times 1200$ ; Б –  $\times 15000$

Минералогический состав межсланцевых глин разнообразен, однако общим для них является наличие кремнезема, гидрослюда, монтмориллонита и кальцита.

Рентгенофазовый состав исследуемой горелой породы проводился на дифрактометре ДРОН-6 с использованием  $\text{CoK}\alpha$ -излучения при скорости вращения столика с образцом 1 град/мин. На рисунке 3 представлена рентгенограмма межсланцевой глины.

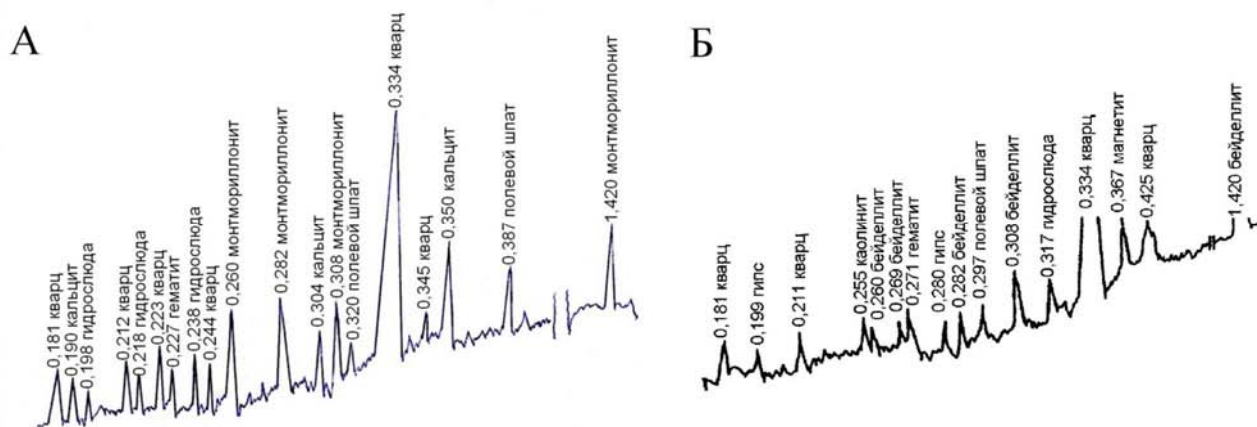


Рисунок 3 – Рентгенограммы глинистых материалов:  
А – межсланцевого, Б – бейделлитового

На дифрактометре порошка межсланцевой глины отмечаются характерные интенсивные линии ( $d/n = 0,190$ ;  $0,304$  и  $0,350$  нм) кальцита, присутствие линии ( $d/n = 0,227$  нм) гематита, линии ( $d/n = 0,181$ ;  $0,212$ ;  $0,223$ ;  $0,244$ ;  $0,334$  и  $0,335$  нм) кварца, линии ( $d/n = 0,198$ ;  $0,218$  и  $0,238$  нм) гидрослюда, линии ( $d/n = 0,260$ ;  $0,282$ ;  $0,308$  и  $1,420$  нм) монтмориллонита и линии ( $d/n = 0,320$  и  $0,387$  нм) полевого шпата.

Глинистые минералы в межсланцевой глине в основном представлены монтмориллонитом с примесью гидрослюда, поэтому она вполне может заменить монтмориллонитовую глину при производстве пористого заполнителя, например керамзита.

Бейделлитовая глина Образцовского месторождения [3] по пластичности относится к среднепластичной глине. Основным породообразующим минералом образцовской глины является бейделлит –  $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , названный по местности Бейделл штата Колорадо

(США) и относящийся к минералам группы монтмориллонита [3, 6]. Химический состав бейделлитовой глины представлен в таблице 1, металлографический анализ – на рисунке 1, микроструктура – на рисунке 2, минералогический состав – на рисунке 3.

**Коэффициент вспучивания** – это отношение объема вспученной гранулы к ее объему после сушки (до вспучивания). Его можно подсчитать по формуле [4-6]:

$$K_{вс} = [p_3^r (1 - 0,01\Pi_n) / p_3^k],$$

где  $p_3^r$  и  $p_3^k$  – плотность зерен сухой гранулы и керамзита, г/см<sup>3</sup>;  $\Pi_n$  – потери при прокаливании (п.п.п.), %.

На рисунке 4 представлена зависимость коэффициента вспучивания от температуры обжига.

Глинистые материалы условно разделены на четыре группы [4, 6].

К первой группе относятся хорошо вспучивающиеся глинистые материалы с коэффициентом вспучивания свыше 4,5. Монтмориллонитовая межсланцевая глина по коэффициенту вспучивания относится к первой группе ( $K_{вс} > 4,5$ ). Бейделлитовая глина Образцовского месторождения по коэффициенту вспучивания относится ко второй группе ( $K_{вс} < 4,5$ ).

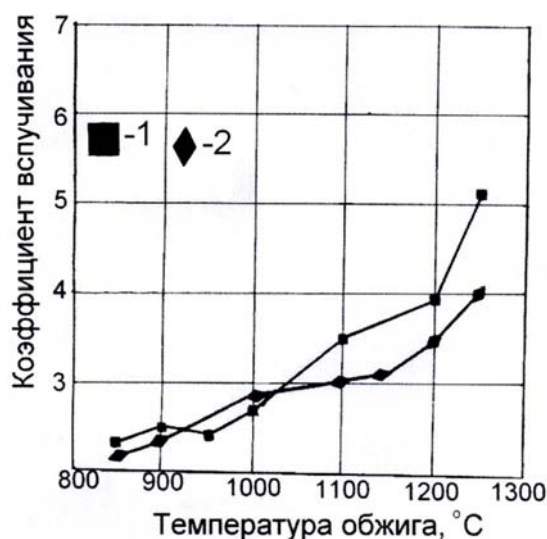


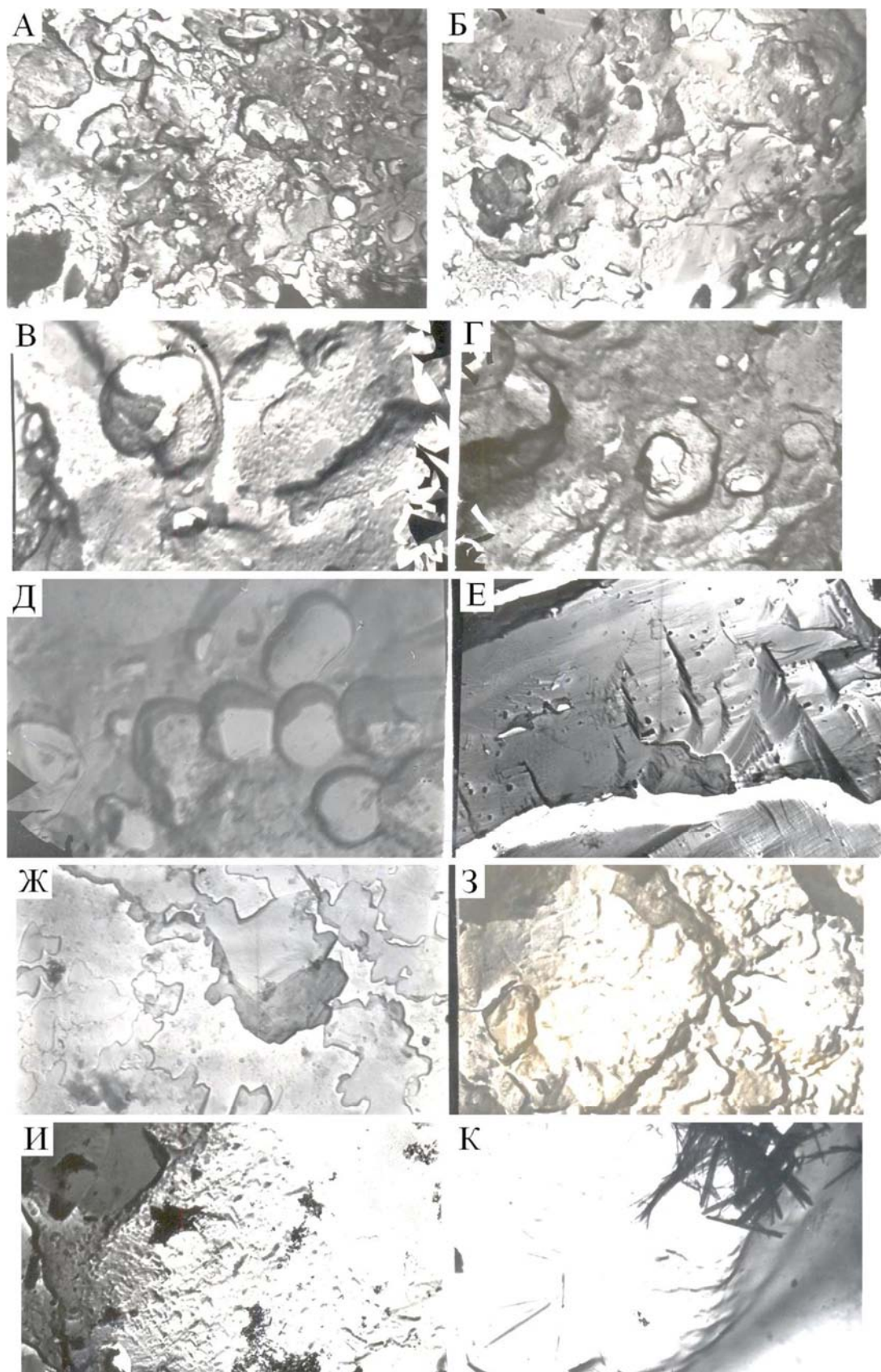
Рисунок 4 – Графики зависимости коэффициента вспучивания от температуры обжига глинистых материалов: 1 – межсланцевого, 2 – бейделлитового

На вспучиваемость глинистых материалов влияет минералогический состав: наилучшей вспучиваемостью обладают каолиновые глины [4, 6]. Как показывают наши исследования, лучше вспучиваются глинистые материалы монтмориллонитового состава (рис. 4, линия 1).

Вспучивание материала является результатом конечного числа актов расширения микропор – «зародышей вспучивания» в результате избыточного давления газов. При этом скорость расширения таких микропор находится в прямой зависимости от вязкости пиропластического расплава. Вязкость массы является одним из важных факторов, определяющих развитие процесса вспучивания.

В материаловедении глинистых материалов вопросу фазовых превращений придается особое значение, так как фазовый состав определяет главным образом эксплуатационные свойства керамических материалов.

При температуре обжига 800°C в образцах из бейделлитовой глины электронно-микроскопические исследования показали поля аморфизованного вещества, остаточные кристаллы монтмориллонита и иллита в виде изоморфных угловатых пластинок и чешуек с резкими очертаниями, мелкие кристаллы кварца и кристаллы полевого шпата таблитчатого облика (рис. 5).



*Рисунок 5 – Микроструктура образцов из бейделлитовой глины, обожженных при температуре, °С: А – 800; Б – 850; В – 900; Г – 950; Д – 1000; Е – 1050; Ж – 1100; З – 1150; И – 1200; К – 1250 (увеличение  $\times 15000$ )*

Повышение температуры обжига до 850°C к особым изменениям в образцах не приводит: в образцах из бейделлитовой глины наблюдаются поля аморфизованных глинистых мине-

ралов, отдельные ромбоэдрические кристаллы кварца, одиночные кристаллы гематита таблитчатого облика (содержание  $Fe_2O_3=8,52$ , табл. 1), скопление кристаллов шпинели в виде октаэдров (см. рис. 5). В образцах из межсланцевой глины также наблюдаются поля аморфизованных глинистых минералов, кристаллы кварца таблитчатого облика, редкие кристаллы гематита таблитчатого облика и небольшое количество мелких кристаллов шпинели (рис. 6).

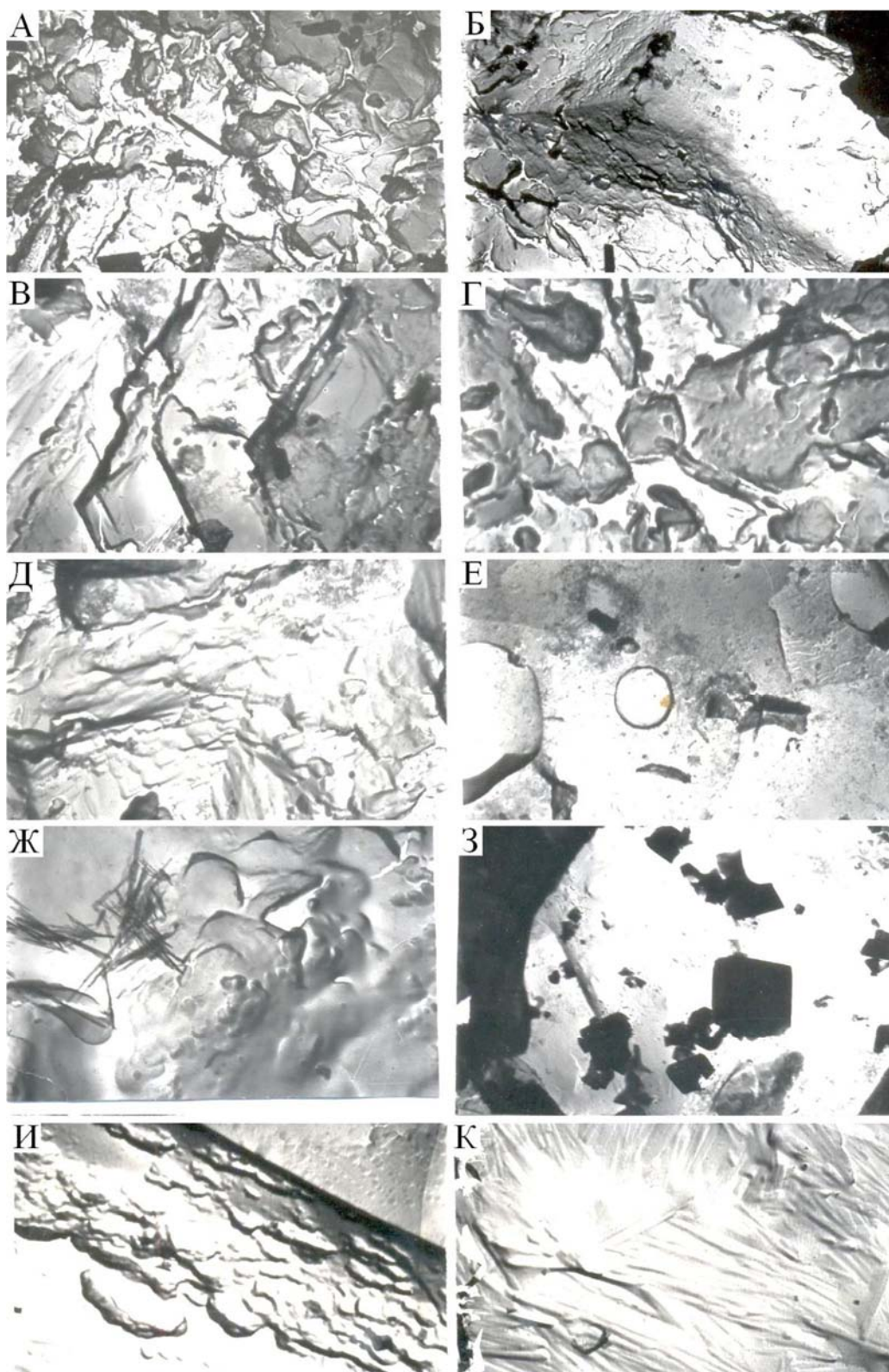


Рисунок 6 – Микроструктура образцов из межсланцевой глины, обожженных при температуре, °С: А – 800; Б – 850; В – 900; Г – 950; Д – 1000; Е – 1050; Ж – 1100; З – 1150; И – 1200; К – 1250 (увеличение  $\times 15000$ )

При температуре обжига 900°C в образцах из бейделлитовой глины электронно-микроскопические исследования показали крупные кристаллы кварца в виде ромбоэдров и призм, кристаллы шпинели октаэдрического облика и хорошо очерченные кристаллы гематита таблитчатого облика. В образцах из межсланцевой глины при температуре 900°C наблюдаются крупные кристаллы кварца и анортита таблитчатого облика (содержание CaO=11-13, табл. 1), небольшое количество кристаллов гематита таблитчатого облика.

Электронно-микроскопические исследования показали, что при температуре обжига 950°C в образцах из бейделлитовой глины наблюдаются поля стеклофазы, значительное количество крупных и средних кристаллов гематита таблитчатого и пластинчатого облика, кристаллы кварца в виде ромбоэдров; небольшие скопления мелких кристаллов шпинели октаэдрического габитуса (см. рис. 5). В образцах из межсланцевой глины при аналогичной температуре наблюдаются крупные кристаллы кварца в виде ромбоэдров и призм, кристаллы анортита таблитчатого облика одиночные кристаллы шпинели и поля стеклофазы.

Увеличение температуры обжига образцов до 950°C к особым изменениям не приводят за исключением увеличения количества стеклофазы, в образцах из бейделлитовой глины наблюдаются поля стеклофазы, крупные кристаллы кварца и гематита таблитчатого облика, скопление мелких и средних кристаллов шпинели октаэдрического облика. В образцах из межсланцевой глины наблюдаются поля стеклофазы, небольшое количество кристаллов шпинели, кристаллы анортита таблитчатого облика, одиночные кристаллы кварца бипирамидального габитуса.

При повышении температуры обжига до 1000°C в образцах из бейделлитовой глины можно отметить значительные по размерам области стеклофазы, слегка оплавленные мелкие кристаллы кварца ромбоэдрического габитуса, мелкие и средние кристаллы шпинели октаэдрического габитуса, отдельные микропоры, крупные кристаллы гематита таблитчатого облика. При температуре обжига 1000°C в образцах из межсланцевой глины электронно-микроскопические исследования показали поля стеклофазы, мелкие кристаллы шпинели октаэдрического габитуса, кристаллы анортита и гематита таблитчатого облика, одиночные хорошо очерченные кристаллы кварца бипирамидального габитуса.

Увеличение температуры обжига образцов до 1050°C к особым изменениям также не приводят за исключением увеличения количества стеклофазы и появления кристобалита в образцах обеих глинистых материалов, в образцах из бейделлитовой глины наблюдаются значительные по размерам области стеклофазы, оплавленные кристаллы кварца, гематита, анортита и кристобалита таблитчатого облика, микропоры. В образцах из межсланцевой глины наблюдаются поля стеклофазы, мелкие и крупные кристаллы шпинели, кристаллы анортита, гематита и кристобалита таблитчатого облика, одиночные мелкие хорошо сохранившиеся средние кристаллы кварца бипирамидального габитуса.

При повышении температуры обжига до 1100°C в образцах из бейделлитовой глины можно отметить значительные области стеклофазы, единичные оплавленные кристаллы кварца призматического габитуса, небольшое количество мелких кристаллов шпинели, отдельные кристаллы кристобалита, оплавленные кристаллы гематита и появление муллита короткопризматического облика. При температуре обжига 1100°C в образцах из межсланцевой глины электронно-микроскопические исследования показали поля стеклофазы, скопление кристаллов кварца бипирамидального габитуса, значительно большее количество мелких и средних кристаллов шпинели октаэдрического габитуса, мелкие кристаллы анортита таблитчатопризматического облика и появление кристаллов муллита игольчатого облика.

При температуре обжига 1100°C в исследуемых образцах происходит значительное увеличение стеклофазы (до 35-45%). Об увеличении содержания стеклофазы свидетельствуют электронно-микроскопические снимки (см. рис. 5 и 6) и изменение соотношения интегральных площадей дифракционных отражений и аморфного «гало».

При повышении температуры обжига до 1150°C в образцах из бейделлитовой глины можно отметить значительные области стеклофазы, оплавленные кристаллы кварца призматического и бипирамидального габитуса, небольшое количество мелких кристаллов шпинели,

отдельные кристаллы кристобалита, оплавленные кристаллы гематита, муллита коротко-столбчатого и призматического облика, одиночные крупные кристаллы  $\alpha$ -кристобалита тетрагональной сингонии. При температуре обжига 1150°C в образцах из межсланцевой глины электронно-микроскопические исследования показали обширные области стеклофазы, скопление кристаллов кварца бипирамидального и призматического габитуса, значительно большее количество мелких и средних кристаллов шпинели октаэдрического габитуса, мелкие кристаллы анортита таблитчато-призматического облика и появление кристаллов муллита игольчатого облика.

При увеличении температуры обжига до 1200°C отмечается увеличение содержания кристаллических новообразований муллита, анортита и кристобалита. Интенсифицируется полиморфный переход  $\alpha$ -кварца в  $\alpha$ -кристобалит, при этом заметно растет содержание жидкой фазы и увеличивается содержание микропор.

В обожженных образцах под микроскопом наблюдается увеличение содержания стеклофазы. Показатели светопреломления стекол изменяются от 1,54 до 1,61. Другие кристаллические фазы (гематит, который ранее был обнаружен под микроскопом) переходят в расплав. Его присутствие не обнаруживается и под микроскопом. По-видимому, матрица стекла захватывает в свою структуру также часть анортита и гематита, т.к. интенсивность их линий снижается. В целом количество стекла в образцах, обожженных при 1200°C, составляет около 40-50%.

Повышение температуры обжига до 1250°C приводит к значительному увеличению стеклофазы и появлению в образцах из бейделлитовой глины игольчатого муллита (см. рис. 6).

Таким образом, в результате проведенных исследований установлены особенности фазовых превращений при обжиге легкоплавких глин с различными химико-минералогическими составами. Установлено, что в бейделлитовой глине и межсланцевой глине появление жидкой фазы отмечается при температуре 950°C, кристобалита при 1050°C, а интенсивная кристаллизация муллита наблюдается при 1100-1150°C.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колпаков, А.В. Физико-химические исследования межсланцевой глины [Текст] / А.В. Колпаков, Д.Ю. Денисов // Material VII Miedzynarodowej naukow-praktycznej konferencji «Wschodnie partnerstwo – 2011» Volume 6. Techniczne nauki. Nowoczesne informacyjne technologie Matematyka. Budownictwo I architektura. Fizyczna kultura i sport Польша, Przemysl (Пшэмысль): Nauka I studia, 2011. Str. 80-83.
2. Колпаков, А.В. Исследование вязкости и коэффициента вспучивания при обжиге керамзита из глинистых материалов различного химико-минералогического состава [Текст] / А.В. Колпаков, Д.Ю. Денисов, В.З. Абдрахимов // Material VII Miedzynarodowej naukow-praktycznej konferencji «Wschodnie partnerstwo – 2011» Volume 6. Techniczne nauki. Nowoczesne informacyjne technologie Matematyka. Budownictwo I architektura. Fizyczna kultura i sport Польша, Przemysl (Пшэмысль): Nauka I studia, 2011. Str. 83-87.
3. Вдовина, Е.В. Термические исследования керамических масс на основе бейделлитовой глины и отходов производств минеральной ваты [Текст] / Е.В. Вдовина, В.З. Абдрахимов // Строительство и реконструкция. – 2010. – №4. – С. 50-52.
4. Онацкий, С.П. Производство керамзита [Текст] / С.П. Онацкий. – М.: Стройиздат, 1971. – 310 с.
5. Абдрахимов, В.З. Курс лекций по дисциплине «Заполнители для бетонов» [Текст] / В.З. Абдрахимов, И.В. Ковков. – Самара: ООО «Центр перспективного развития», 2006. – 70 с.
6. Абдрахимов, В.З. Керамические строительные материалы [Текст] / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова. – Самара: Самарская академия государственного и муниципального управления, 2010. – 364 с.

#### **Колпаков Александр Викторович**

Самарская академия государственного и муниципального управления, г. Самара  
Аспирант  
Тел.: +7 908 393 33 32  
E-mail: roland.alex@mail.ru

#### **Абдрахимов Владимир Закирович**

Самарская академия государственного и муниципального управления  
Доктор технических наук, профессор  
Ph.: +7 960 816 26 65  
E-mail: 3375892@mail.ru



## STUDY OF HEAVING RATIO AND PHASE COMPOSITION AT VARIOUS STAGES OF SLATE CLAY BAKING

*Researches have shown, that the best swell intershale montmorillonite clay in relation to beidellite clay. As a result of the researches the specific features of phase transformations during the firing of fusible clays with different chemical and mineralogical composition. It is established, that in beidellite clay and intershale clay occurrence of a liquid phase is marked at temperature 950°C, kristoballite at 1050°C, and intensive crystallization myllite at 1100-1150°C.*

**Keywords:** expanded clay, intershale clay, beidellite, burn, factor to increase, the x-ray analysis, IR-spectroscopic analysis, phase structure, christobalite, hematite, mullite.

### BIBLIOGRAPHY

1. Kolpakov, A.V. Fiziko-himicheskie issledovanija mezhslancavoj gliny [Tekst] / A.V. Kolpakov, D.Ju. Denisov // Material VII Miedzynarodowej naukow-praktycznej konferencji «Wschodnie partnerstwo – 2011» Volume 6. Techniczne nauki. Nowoczesne informacyjne technologie Matematyka. Budownictwo I architektura. Fizyczna kultura i sport Pol'sha, Przemysl (Pshémysl'): Nauka I studia, 2011. Str. 80-83.
2. Kolpakov, A.V. Issledovanie vjazkosti i koeficienta vspuchivanja pri obzhige keramzita iz glinistyh materialov razlichnogo himiko-mineralogicheskogo sostava [Tekst] / A.V. Kolpakov, D.Ju. Denisov, V.Z. Abdrahimov // Material VII Miedzynarodowej naukow-praktycznej konferencji «Wschodnie partnerstwo – 2011» Volume 6. Techniczne nauki. Nowoczesne informacyjne technologie Matematyka. Budownictwo I architektura. Fizyczna kultura i sport Pol'sha, Przemysl (Pshémysl'): Nauka I studia, 2011. Str. 83-87.
3. Vdovina, E.V. Termicheskie issledovanija keramicheskikh mass na osnove bejdellitovoj gliny i othodov proizvodstv mineral'noj vaty [Tekst] / E.V. Vdovina, V.Z. Abdrahimov // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – 2010. – №4. – S. 50-52.
4. Onackij, S.P. Proizvodstvo keramzita [Tekst] / S.P. Onackij. – M.: Strojizdat, 1971. – 310 s.
5. Abdrahimov, V.Z. Kurs lekcij po discipline «Zapolniteli dlja betonov» [Tekst] / V.Z. Abdrahimov, I.V. Kovkov. – Samara: OOO «Centr perspektivnogo razvitija», 2006. – 70 s.
6. Abdrahimov, V.Z. Keramicheskie stroitel'nye materialy [Tekst] / V.Z. Abdrahimov, E.S. Abdrahimova. – Samara: Samarskaja akademija gosudarstvennogo i municipal'nogo upravlenija, 2010. – 364 s.

#### **Kolpakov Aleksandr Viktorovich**

Samara academy of state and municipal management, Samara  
Post-graduate student  
Ph.: +7 908 393 33 32  
E-mail: roland.alex@mail.ru

#### **Abdrakhimov Vladimir Zakirovich**

Samara academy of state and municipal management, Samara  
Doctor of technical sciences, professor  
Ph.: +7 960 816 26 65  
E-mail: 3375892@mail.ru

ЛАДАЕВ Н.М., ЖБАНОВ Н.С.

## ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В РОТОРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

*Считаем, что нагревание воздушного потока в роторной мельнице происходит за счет торможения потока и рассеивания механической энергии в виде тепла («мятие»). Для этого предполагаем, что при ударе о стенку поток тормозится адиабатически, и его энергия переходит в тепло. Для определения диссипативной функции задаемся распределением скоростей многоугольнике между вращающимся ротором и неподвижной стенкой с учетом изменения давления вдоль ротора.*

**Ключевые слова:** воздушный поток, диссипативная функция, адиабатное торможение, окружная скорость.

При движении воздушного потока в мельницах ударно-отражательного принципа действия, как показывает практика, происходит его нагревание. Это вызвано тем, что при работе мельницы часть механической энергии расходуется на деформацию воздушного потока, которая приводит к изменению его внутренней энергии.

Для рассмотрения этого процесса будем считать, что работа «мятия» воздушного потока полностью идет только на изменение его внутренней энергии, теплообмен потока с аппаратом отсутствует.

Исходя из этих допущений, баланс энергий можно записать в виде [1]:

$$C_p \rho \frac{Dt}{D\tau} = \frac{DP}{D\tau} + \Phi, \quad (1)$$

где  $Dt/D\tau$  и  $DP/D\tau$  – полные дифференциалы изменения температуры и давления;  $\Phi$  – диссипативная функция.

Диссипативная функция ( $\Phi$ ) учитывает обусловленный наличием внутреннего трения процесс рассеивания механической энергии. Отношение  $DP/D\tau$  представляет собой полную производную от давления по времени и учитывает работу сжатия воздушного потока.

При установившемся (стационарном) режиме работы мельницы основная деформация происходит в пограничном слое потока. Пограничный слой формируется около подвижных ударных элементов и неподвижных контрударных поверхностей мельницы. Поэтому изменение температуры, давления и диссипативной функции будет происходить вдоль движения потока в мельнице.

Для стационарного режима течения уравнение энергии (1) можно записать в виде:

$$C_p \rho g \frac{dt}{dx} = g \frac{dP}{dx} + \Phi. \quad (2)$$

Если правую и левую части уравнения разделить на  $g \cdot C_p \cdot \rho$ , то выражение (2) примет вид:

$$g \frac{dt}{dx} = \frac{1}{C_p \rho} \cdot \frac{dP}{dx} + \frac{1}{g C_p \rho} \Phi. \quad (3)$$

Уравнение (3) показывает, что изменение температуры по длине потока зависит от суммы изменений температур по длине, обусловленных силами давления и силами внутреннего трения (вязкости).

Рассмотрим по отдельности эти изменения температур. Изменения температуры вызванное изменением давления можно записать в виде:

$$\frac{dt_p}{dx} = \frac{1}{C_p} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx}. \quad (4)$$

Для установившегося потока уравнение Навье-Стокса в пограничном слое можно записать:

$$\vartheta \frac{d\vartheta}{dx} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP}{dx}. \quad (5)$$

При адиабатическом замедлении скорости до нуля с учетом выражения (4) и (5) изменение температуры можно записать:

$$\Delta t_p = \vartheta^2 / 2C_p. \quad (6)$$

Изменение температуры, вызванное силами внутреннего трения можно записать:

$$\frac{dt_\mu}{dx} = \frac{\Phi}{C_p \rho \vartheta}. \quad (7)$$

В общем случае диссипативная функция имеет сложное описание. Однако в литературе [2] показано, что если жидкости находящиеся в зазоре между двумя пластинами, одна из которых подвижная, а другая неподвижная, то накопленная в слое энергия превращается в тепло.

$$\Phi = \mu \left( \frac{d\vartheta}{dy} \right)^2. \quad (8)$$

Если считать, что основная работа «мятия» происходит в пространстве, где установлены била, тогда для определения диссипативной функции необходимо знать распределение скоростей по высоте била ( $\delta$ ). Для этого зададимся распределением скорости по высоте била многочленом вида [2]:

$$\vartheta = a + by + cy^2 + dy^3. \quad (9)$$

с соблюдением следующих граничных условий.

На поверхности диска у основания била скорость равна скорости диска т.е.:

$$\vartheta = \vartheta_d \text{ при } y = 0, \quad (10)$$

и примем скорость потока равной нулю по высоте била, т.е.:

$$\vartheta = 0 \text{ при } y = \delta. \quad (11)$$

Так как давление вдоль диска (по длине била) изменяется, то можно записать:

$$\frac{dP}{dx} = \mu \left( \frac{d^2\vartheta}{dy^2} \right) \text{ при } y = 0. \quad (12)$$

За пределом высоты била  $y > \delta$  примем:

$$\frac{d\vartheta}{dy} = 0 \text{ при } y = \delta. \quad (13)$$

Используя выражение (5), выражение (12) можно записать:

$$\left( \frac{d^2\vartheta}{dy^2} \right) = -\frac{1}{\nu} \vartheta \frac{d\vartheta}{dx}. \quad (14)$$

Используя граничные условия 10, 11, 13, 14 можно определить коэффициенты в уравнении (9).

Дифференцируя уравнение (9) с учетом полученных коэффициентов при  $y = 0$ , получим:

$$\frac{d\vartheta}{dy} = \left( \frac{3}{2} + \frac{k}{2} \right) \cdot \frac{\vartheta_d}{\delta}. \quad (15)$$

Возведя производную в квадрат выражения (15) и используя выражение (8), а также учитывая, что  $x/\vartheta = \tau$ , используя выражение (7), после интегрирования получим:

$$\Delta t_{\mu} = \frac{g^2}{2C_p} \cdot \frac{2\nu\tau}{\delta^2} \left( \frac{3+k}{2} \right)^2. \quad (16)$$

Складывая выражение (6) и (13) получим:

$$\Delta t = \frac{g^2}{2C_p} \left( 1 + \frac{\nu\tau}{2\delta^2} (3+k)^2 \right). \quad (17)$$

Переходя к окружной скорости, получим изменение температуры потока в мельнице:

$$\Delta t = \frac{\omega^2 R^2}{2C_p} \left( 1 + \frac{\nu\tau}{2\delta^2} (3+k)^2 \right), \quad (18)$$

где  $R$  – радиус ротора;  $\omega$  – угловая скорость;  $C_p$  – теплоемкость;  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $\delta$  – высота била;  $\tau$  – время пребывания воздуха в аппарате;  $k$  – форм параметр  $\left( k = \frac{\delta^2}{2\lambda} \cdot \frac{d\theta}{dx} \right)$ .

Как видно из уравнения (18), все члены этого выражения можно определить из геометрических и технологических параметров мельницы, кроме форм параметра.

Нами были проведены испытания мельницы на холостом ходу в установившемся режиме. На основании исследования было установлено, что форм параметр можно определить из выражения:

$$k = 1,27 \cdot 10^{-3} \omega. \quad (19)$$

Таким образом, используя выражение (18) и (19), можно определить изменение температуры воздушного потока внутри мельницы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
2. Эккерт, Э.Р. Теория тепло- и массообмена [Текст] / Э.Р. Эккерт, Р.М. Дрейк. – М-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1961. – 679 с.

### Ладаев Николай Михайлович

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство строительных материалов»  
Тел.: +7 (4932) 41-39-06  
E-mail: k\_psm@igasu.ru

### Жбанов Никита Сергеевич

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Аспирант кафедры «Строительная механика»  
Тел.: +7 (4932) 41-39-06  
E-mail: ns\_dozor@mail.ru

LADAYEV N.M., JBANOV N.S.

## INFLUENCE OF ROTATION OF THE ROTOR ON CHANGE OF AIR TEMPERATURE IN THE ROTOR MILL

*We believe that the warming of the air flow within the rotor mill is due to deceleration of the flow and dispersion of the mechanical energy in the form of heat ("collapse"). To do this, we can as-*

*sume that if you hit the wall of the flow is inhibited adiabatically, and its energy is converted into heat. To determine the dissipative function we ask a distribution of velocities polynomial between the rotating rotor and the fixed wall with a view of change of pressure along the rotor.*

**Keywords:** *air flow, dissipation function, адиабатное braking, peripheral speed.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Shlihting, G. Teoriya pogranichnogo sloja [Tekst] / G. Shlihting. – M.: Nauka, 1974. – 712 s.
2. Jekkert, Je.R. Teoriya teplo- i massoobmena [Tekst] / Je.R. Jekkert, R.M. Drejk. – M-L.: Gosudarstvennoe jenergeticheskoe izdatel'stvo, 1961. – 679 s.

### **Ladayev Nikolay Mikhaylovich**

Ivanovo state architectural and construction university, Ivanovo

Candidate of echnical sciences, associate professor of department «Production of construction materials»

Ph.: +7 (4932) 41-39-06

E-mail: k\_psm@igasu.ru

### **Jbanov Nikita Sergejevich**

Ivanovo state architectural and construction university, Ivanovo

Graduate student of department «Construction mechanics»

Ph.: +7 (4932) 41-39-06

E-mail: k\_psm@igasu.ru

ЛУКУТЦОВА Н.П., ПЫКИН А.А., УСТИНОВ А.Г., КОНДРИК А.С.

## КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ БЕТОНА С ДОБАВКОЙ УГЛЕРОД-КРЕМНЕЗЕМИСТОГО НАНОМОДИФИКАТОРА

*Обоснована возможность увеличения коррозионной стойкости мелкозернистого бетона к воздействию кислотных сред и повышения его защитных свойств по отношению к коррозии стальной арматуры при использовании модифицирующей добавки в виде водной суспензии наночастиц углерода и кремнезема, стабилизированных анионами ПАВ нафталин-формальдегидного типа.*

**Ключевые слова:** *углерод-кремнеземистый наномодификатор, мелкозернистый бетон, кислотная коррозия бетона, глубина разрушения, коэффициент коррозионной стойкости, коррозия арматуры.*

Одной из важнейших задач современного бетоноведения является поиск эффективных технологических приемов, позволяющих не только повышать физико-механические свойства бетонов, но и положительно влиять на их коррозионную стойкость.

Бетонные и железобетонные изделия и конструкции при эксплуатации довольно часто оказываются под воздействием сред, вызывающих их кислотную коррозию. Так в инфраструктуре городов сильному кислотному поражению подвергается бетон коллекторов сточных вод. В этих сооружениях сероводород является благоприятной средой для развития аэробных тионовых бактерий, выделяющих серную кислоту, концентрация которой достигает 5-20%. Интенсивной коррозии подвергаются мелкоштучные бетонные изделия городского и дорожного благоустройства при воздействии на них кислотных дождей, а также конструкции подвальных помещений, увлажняемые кислыми сточными водами через поврежденные участки водоотводящих каналов, лотков и приямков или при повышении уровня грунтовых вод [1-3].

Известно, что под действием кислот на цементный камень образуется кальциевая соль и аморфная бесвязная масса. Образовавшиеся продукты (растворимые в воде) выносятся ею из бетона, а не растворимые остаются в виде рыхлых масс. Все это сопровождается снижением прочности бетона, а в последующем и полным его разрушением [1, 4].

Целью работы является изучение влияния углерод-кремнеземистого наномодификатора (УКНМ) в виде водной суспензии, полученной ультразвуковым диспергированием продукта совместного помола отсевов дробления шунгитосодержащих пород III вида и анионоактивного ПАВ из группы нафталин-формальдегида, на коррозионную стойкость мелкозернистого бетона (МЗБ) в растворах соляной и серной кислот, а также определение степени защитного действия модифицированного бетона по отношению к коррозии стальной арматуры.

Целесообразность работы связана с тем, что добавка УКНМ является эффективным наномодификатором, уплотняющим структуру МЗБ и позволяющим существенно улучшить его физико-технические характеристики, а именно ускорить набор прочности в ранние сроки твердения, повысить прочность при сжатии и изгибе в проектном возрасте, а также снизить истираемость и водопоглощение [5].

Исследование коррозионной стойкости мелкозернистого бетона с полученным наномодификатором к воздействию выбранных кислотных сред осуществлялось в соответствии с ГОСТ 31383 [6] на образцах размерами 4×4×16 см контрольного состава при В/Ц=0,43 и с содержанием 10% УКНМ односуточного возраста при В/Ц=0,39. Установлено, что именно через 1 сут. после ультразвукового диспергирования добавка, содержащая около 23% частиц с размерами менее 100 нм в интервале от 51 до 304 нм, обладает максимальной эффективностью.

Степень коррозионного воздействия на контрольные и модифицированные образцы МЗБ определялась по глубине их разрушения  $\Gamma_p$  и коэффициенту коррозионной стойкости  $K_{cm}$  – изменению прочности бетона за время испытания в растворах кислот по отношению к ее

значению в неагрессивной среде (табл. 1).

Таблица 1 – Глубина разрушения и коэффициенты коррозионной стойкости мелкозернистого бетона в растворах кислот через 1 год

Концентрация кислоты, моль/дм <sup>3</sup> рН раствора		Глубина разрушения $\Gamma_p$ , мм,	Предел прочности при сжатии, МПа	Коэффициент коррозионной стойкости $K_{cm}$
МЗБ контрольного состава в растворе соляной кислоты HCl				
0,01	рН = 2	2	21,6	0,42
0,001	рН = 3	1,2	25,8	0,5
0,0001	рН = 4	0,5	36,6	0,71
МЗБ с добавкой УКНМ в растворе соляной кислоты HCl				
0,01	рН = 2	1,5	64,1	0,76
0,001	рН = 3	0,7	70,3	0,83
0,0001	рН = 4	0,3	81,9	0,97
МЗБ контрольного состава в растворе серной кислоты H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>				
0,01	рН = 2	1,4	34	0,66
0,001	рН = 3	0,9	36,3	0,71
0,0001	рН = 4	0,6	44,8	0,87
МЗБ с добавкой УКНМ в растворе серной кислоты H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>				
0,01	рН = 2	1,2	80,2	0,93
0,001	рН = 3	0,8	83,5	0,99
0,0001	рН = 4	0,4	85,2	1,01

**Примечание:** испытывались образцы, изготовленные из смеси состава 1:3 (цемент ЦЕМ I42,5Н, Белоруссия, кварцевый песок с модулем крупности 1,7) твердеющие в естественных условиях.

Результаты исследований показали, что мелкозернистый бетон с углерод-кремнеземистым наномодификатором, в отличие от бездобавочного МЗБ, характеризуется меньшей проницаемостью и реакционной способностью цементного камня по отношению к агрессивным веществам растворов соляной и серной кислот, о чем свидетельствуют менее глубокие коррозионные поражения и более высокие коэффициенты коррозионной стойкости модифицированных образцов по сравнению с контрольными.

С увеличением концентрации кислоты HCl от 0,0001 до 0,01 моль/дм<sup>3</sup> и снижением рН раствора от 4 до 2 глубина разрушения бетона контрольного состава через 1 год испытаний повышается от 0,5 до 2 мм, что в 1,7 и 1,3 раза больше соответствующих значений  $\Gamma_p$  модифицированных образцов. Коэффициент коррозионной стойкости МЗБ с добавкой в этом случае изменяется от 0,97 до 0,76, а без нее – от 0,71 до 0,42 соответственно.

В то же время глубина разрушения бездобавочного бетона в растворе серной кислоты при увеличении концентрации H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> от 0,0001 до 0,01 моль/дм<sup>3</sup> возрастает от 0,6 до 1,4 мм, а МЗБ с наномодификатором – от 0,4 до 1,2 мм. При этом коэффициент коррозионной стойкости модифицированных образцов снижается от 1 до 0,93, превосходя соответствующие значения  $K_{cm}$  бетона контрольного состава в 1,2-1,4 раза.

Очевидно, что степень коррозионного поражения образцов мелкозернистого бетона с добавкой и без нее выше в растворах соляной кислоты, которая, как известно, приводит к выделению легко растворимого хлорида кальция в отличие от серной кислоты, образующей при взаимодействии с цементным камнем малорастворимый гипс. А чем больше растворимость кальциевой соли, тем выше скорость коррозии [1, 3].

По величине  $\Gamma_p$  контрольных и модифицированных образцов МЗБ в растворах кислот, рассчитываемой через каждые 60 сут. до 1 года испытаний, построены графики в координатах «квадратный корень от времени» – «глубина коррозии» (рис. 1, 2).

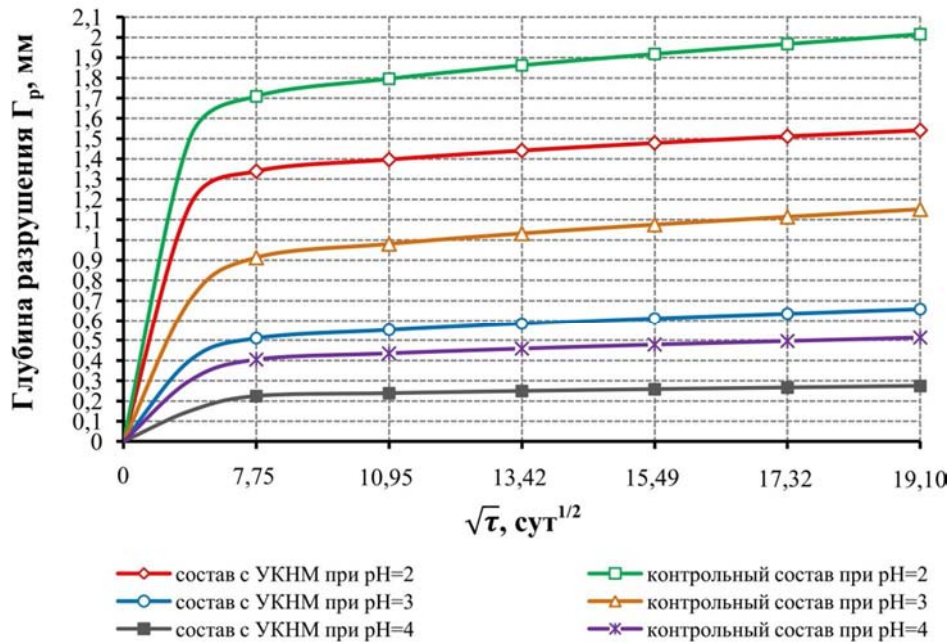


Рисунок 1 – Кинетика глубины коррозионного разрушения мелкозернистого бетона в растворах соляной кислоты

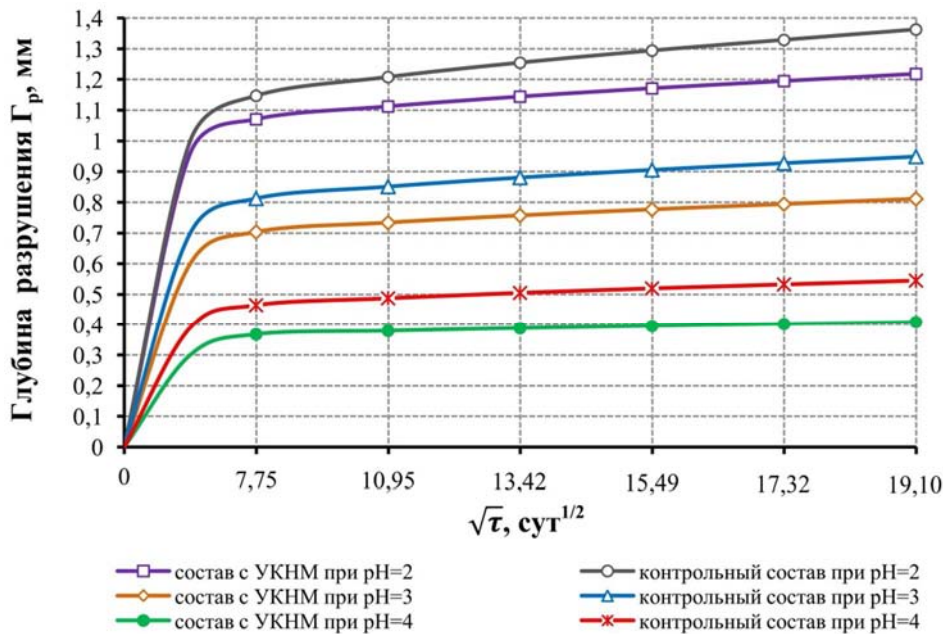


Рисунок 2 – Кинетика глубины коррозионного разрушения мелкозернистого бетона в растворах серной кислоты

По прямолинейному участку графиков определялись константа коррозионного процесса  $K$  как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс и постоянная  $a$ , учитывающая влияние процессов, протекающих в диффузионно-кинетической области в начальный период, по точке пересечения прямой с осью ординат. Полученные значения  $K$  и  $a$  позволили спрогнозировать глубину разрушения мелкозернистого бетона при коррозионном воздействии растворов кислот в большие сроки (табл. 2).



Таблица 2 – Прогнозируемая величина глубины разрушения мелкозернистого бетона в растворах кислот в поздние сроки

Наименование показателей	рН раствора кислоты					
	HCl			H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
	2	3	4	2	3	4
МЗБ контрольного состава, В/Ц 0,43						
Константа коррозии $K$ , $\times 10^{-3}$ мм/сут <sup>1/2</sup>	27	21	9,6	19	12	7,1
Постоянная $a$ , мм	1,5	0,75	0,33	1	0,72	0,41
Глубина разрушения $G_p$ , мм:						
- через 30 лет	4,3	2,9	1,3	3	2	1,2
- через 50 лет	5,2	3,6	1,6	3,6	2,3	1,4
МЗБ с 10 % добавки УКНМ, В/Ц 0,39						
Константа коррозии $K$ , $\times 10^{-3}$ мм/сут <sup>1/2</sup>	18	13	4,4	13	9,5	3,6
Постоянная $a$ , мм	1,2	0,41	0,19	0,97	0,63	0,34
Глубина разрушения $G_p$ , мм:						
- через 30 лет	3,1	1,7	0,6	2,3	1,6	0,7
- через 50 лет	3,6	2,2	0,8	2,7	1,9	0,8

Расчетные данные показывают, что глубина разрушения мелкозернистого бетона контрольного состава через 30 лет экспозиции в растворах соляной и серной кислот с рН от 4 до 2 будет составлять 1,3-4,3 мм и 1,2-3 мм, а МЗБ с добавкой УКНМ – 0,6-3,1 мм и 0,7-2,3 мм соответственно. Прогнозируемая величина  $G_p$  модифицированного МЗБ через 50 лет может достигать значений 0,8-3,6 мм и 0,8-2,7 мм при воздействии растворов HCl и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> с показателем рН от 4 до 2 соответственно, а бетона без добавки – 1,6-5,2 мм и 1,4-3,6 мм соответственно.

Отметим, что углеродная составляющая шунгитосодержащих пород вносит определенные трудности в обеспечение долговечности армированных бетонных изделий и конструкций, поскольку является эффективным катодом по отношению к стали, вызывая нарушение ее пассивного состояния и коррозию. Такими же свойствами обладают стальная фибра, частицы угля, графита, кокса, сажи и другие наполнители, обладающие электропроводностью и способностью образовывать со стальной арматурой в «теле» бетона гальванические пары [7].

Учитывая данное обстоятельство, были выполнены исследования по определению коррозионной стойкости стальной арматуры в мелкозернистом бетоне с углерод-кремнеземистым наномодификатором и без него на образцах с размерами 7×7×14 см, армированных стержнями длиной 10 см из стали классов А-III, Ат400С и Вр-I при толщине защитного слоя 2 см и хранившихся после 28 сут. естественного твердения в условиях переменного увлажнения и высушивания.

Степень коррозионного поражения арматуры оценивалась по потере массы стальных стержней, извлеченных из контрольных и модифицированных образцов МЗБ, и скорости коррозии после 6 мес. испытаний (табл. 3).

Установлено, что мелкозернистый бетон как без добавки УКНМ, так и при ее содержании обладает защитным действием от коррозии стальной арматуры исследуемых классов, поскольку в обоих случаях потеря массы стержней, извлеченных из образцов МЗБ через 6 мес., не превышает допустимого критического значения 10 г/м<sup>2</sup>.

Таблица 3 – Показатели коррозионной стойкости стальной арматуры в мелкозернистом бетоне после 6 мес. переменного увлажнения и высушивания

Диаметр арматурного стержня, мм, класс стали	Потеря массы, г/м <sup>2</sup>		Скорость коррозии, × 10 <sup>-4</sup> г/(м <sup>2</sup> · ч)	
	в бетоне контрольного состава, В/Ц 0,43	в бетоне с 10 % УКНМ, В/Ц 0,39	в бетоне контрольного состава, В/Ц 0,43	в бетоне с 10 % УКНМ, В/Ц 0,39
6-А-III (А400)	5,2	3,3	12	7,6
6-Ат400С	9,8	6,6	22,7	15,3
4-Вр-I	3,7	1,5	8,6	3,5

Как следует из полученных результатов, использование углерод-кремнеземистого наномодификатора приводит к существенному повышению защитных свойств мелкозернистого бетона, позволяющего в условиях переменного увлажнения и высушивания снизить скорость коррозии арматуры классов Ат400С, А-III, Вр-I на 33, 37 и 59% соответственно благодаря большей плотности и низкой величины водопоглощения, по сравнению с МЗБ контрольного состава [5].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москвин, В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты [Текст] / В. М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев и др. – М.: Стройиздат, 1980. – 244 с.
2. Федосов, С.В. Сульфатная коррозия бетона [Текст] / С.В. Федосов. – М.: АСВ, 2003. – 191 с.
3. Розенталь, Н.К. Коррозионная стойкость модифицированных бетонов. Часть 1 [Текст] / Н.К. Розенталь // Технологии бетонов. – 2009. – №1 (30). – С. 38-41.
4. Гридчин, А.М. Строительные материалы для эксплуатации в экстремальных условиях [Текст] / А.М. Гридчин, Ю.М. Баженов, В.С. Лесовик и др. – М.: АСВ; Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2008. – 595 с.
5. Лукутцова, Н.П. Технико-экологическое обоснование получения наномодификатора для бетона [Текст] / Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин, С.В. Ширко, А.А. Мацаенко // Строительство и реконструкция. – 2012. – №3 (41) (май-июнь). – С. 42-47.
6. ГОСТ 31383-2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 24 с.
7. Кравченко, Т.Г. Модифицированные токопроводящие шунгитобетоны [Текст] / Т.Г. Кравченко, А.Г. Терешко, Е.И. Хромилин и др. // В кн.: Бетоны с эффективными модифицирующими добавками; под ред. Ф.М. Иванова, В.Г. Батракова. – М.: НИИЖБ, 1985. – С. 77-84.

**Лукутцова Наталья Петровна**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск  
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Производство строительных конструкций»  
 Тел.: +7 915 801 44 19  
 E-mail: natluk58@mail.ru

**Пыкин Алексей Алексеевич**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск  
 Аспирант кафедры «Производство строительных конструкций»  
 Тел.: +7 915 295 74 01  
 E-mail: leshkin22@rambler.ru

**Устинов Александр Геннадьевич**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск  
 Аспирант кафедры «Производство строительных конструкций»  
 Тел.: +7 910 336 52 28  
 E-mail: allexian@mail.ru

**Кондрик Александр Сергеевич**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия, г. Брянск  
 Студент кафедры «Производство строительных конструкций»

LUKUTTSOVA N.P., PYKIN A.A., USTINOV A.G.,  
KONDRIK A.S.

## CORROSION BEHAVIOR OF CONCRETE WITH ADMIXTURE OF SILICA-CARBON NANO-MODIFIER

*The possibility of increasing the corrosion resistance of fine-grained concrete to acid environments and enhance its protective properties against corrosion of steel reinforcement in the use of modifying additives in the form of an aqueous suspension of carbon and silica nanoparticles, stabilized by surfactant anions of naphthalene-formaldehyde type.*

**Keywords:** carbon-silica nanomodificator, fine-grained concrete, acid corrosion of concrete, the depth of destruction, the coefficient of resistance to corrosion, corrosion of reinforcement.

### BIBLIOGRAPHY

1. Moskvina, V.M. Korrozija betona i zhelezobetona, metody ih zavity [Tekst] / V. M. Moskvina, F.M. Ivanov, S.N. Alekseev i dr. – M.: Strojizdat, 1980. – 244 s.
2. Fedosov, S.V. Sul'fatnaja korrozija betona [Tekst] / S.V. Fedosov. – M.: ASV, 2003. – 191 s.
3. Rozental', N.K. Korroziionnaja stojkost' modifirovannyh betonov. Chast' 1 [Tekst] / N.K. Rozental' // Tehnologii betonov. – 2009. – №1 (30). – S. 38-41.
4. Gridchin, A.M. Stroitel'nye materialy dlja jeksploatacii v jekstremal'nyh uslovijah [Tekst] / A.M. Gridchin, Ju.M. Bazhenov, V.S. Lesovik i dr. – M.: ACB; Belgorod: BGU im. V.G. Shuhova, 2008. – 595 s.
5. Lukutsova, N.P. Tehniko-jekologicheskoe obosnovanie poluchenija nanomodifikatora dlja betona [Tekst] / N.P. Lukutsova, A.A. Pykin, S.V. Shirko, A.A. Macaenko // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – 2012. – №3 (41) (maja-jun'). – S. 42-47.
6. GOST 31383-2008. Zawita betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij ot korrozii. Metody ispytanij [Tekst]. – M.: Izd-vo standartov, 2008. – 24 s.
7. Kravchenko, T.G. Modifirovannye tokoprovodjajie shungitobetonny [Tekst] / T.G. Kravchenko, A.G. Tereshko, E.I. Hromilin i dr. // V kn.: Betonny s jeffektivnymi modifirovannymi dobavkami; pod red. F.M. Ivanova, V.G. Batrakova. – M.: NIIZhB, 1985. – S. 77-84.

#### **Lukutsova Natalia Petrovna**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk  
Doctor of technical science, professor of department «Production of construction designs»  
Ph.: +7 915 801 44 19  
E-mail: natluk58@mail.ru

#### **Pykin Alexey Alekseevich**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk  
Graduate student of department «Production of construction designs»  
Ph.: +7 915 295 74 01  
E-mail: leshkin22@rambler.ru

#### **Ustinov Alexander Gennadevich**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk  
Graduate student of department «Production of construction designs»  
Ph.: +7 910 336 52 28  
E-mail: allexian@mail.ru

#### **Kondrik Alexander Sergeevich**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk  
Student of department «Production of construction designs»

ОГУРЦОВ В.А., ОГУРЦОВ А.В., МИТРОФАНОВ А.В., АЛЕШИНА А.П.

## ЯЧЕЕЧНАЯ МОДЕЛЬ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Предложена нелинейная ячеечная математическая модель гидромеханического и теплового процесса в реакторе с псевдоожигенным слоем. Модель позволяет рассчитывать расширение слоя, распределение содержания частиц и локальных скоростей обтекания по его высоте, а также теплообмен между частицами и газом. Расчетные результаты по модели находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными.*

**Ключевые слова:** псевдоожигенный слой, ячеечная модель, вектор состояния, переходная матрица, распределение содержания частиц.

Для интенсификации тепло- и массообменных гетерогенных процессов с твердой фазой часто используются аппараты с псевдоожигенным слоем. В ряде случаев применение технологии псевдоожигения представляет особый интерес для реализации технологических процессов строительной индустрии, например, для обжига магнезиальных карбонатных пород применение псевдоожигенного слоя является практически безальтернативным вариантом. Дело в том, что при производстве автоклавных материалов приходится избегать применения известки с содержанием оксида магния более 5%, хотя по данным геологических разведок около половины разведанных известняков на территории стран СНГ являются высокомагнезиальными, а запасы чистых кальциевых пород уменьшаются [1, 2]. Ограничение содержания оксида магния обусловлено тем, что при обжиге магнезиальных известняков во вращающихся или шахтных печах в результате значительной продолжительности обжига (от 1 до 10 ч) и большого различия между температурой газовой среды в печах и теоретической температурой диссоциации  $MgCO_3$  (400-600°C) в готовом продукте образуется минерал периклаз, который характеризуется замедленной гидратацией с увеличением объема, что вызывает снижение прочности и даже полное разрушение изделий при автоклавной обработке [1, 2].

При быстром обжиге (в течение нескольких минут) магнезиальных пород в псевдоожигенном слое данное ограничение в значительной степени устраняется. Однако такая технология не получила должного распространения в основном из-за трудности прогнозирования параметров проведения процесса в псевдоожигенном слое, связанной с отсутствием простых в использовании, но в то же время эффективных моделей псевдоожигения.

Существующие модели псевдоожигения либо оперируют с интегральным описанием слоя, рассматривая его как единое целое с мгновенным идеальным перемешиванием частиц, либо напротив – рассматривают условно бесконечно малый объем, считая его достаточно представительным для описания движения всех фаз. Интегральное представление слоя не позволяет учитывать его структурную неоднородность. Рассмотрение же бесконечно малого объема слоя сопряжено с математическими сложностями и громоздкими вычислительными процедурами.

Научной целью данной работы является разработка компромиссной модели, которая, с одной стороны, учитывала бы распределение параметров по высоте слоя, а с другой – не требовала сложных идентификационных процедур и математических операций.

Предлагаемая схема ячеечной модели аппарата с псевдоожигенным слоем показана на рисунке 1. Пространство аппарата разбито по высоте на  $n$  ячеек идеального смешения. Эволюция состояния псевдоожигенного слоя описывается рекуррентным матричным равенством:

$$S^{N+1} = P^N \cdot S^N, \quad (1)$$

где  $S$  – вектор объемов материала в ячейках;  $N$  – номер перехода;  $P$  – матрица переходных вероятностей (переходная матрица).

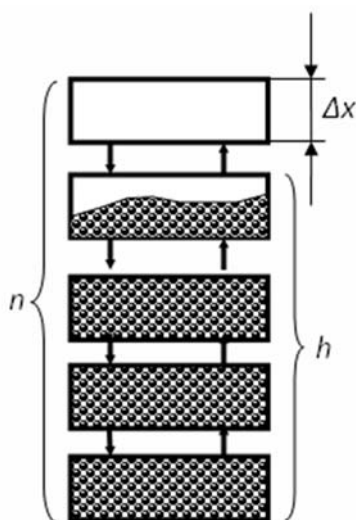


Рисунок 1 – Расчетная схема ячеечной модели процесса

В реальном псевдооживленном слое наличие твердых частиц в сечении аппарата приводит к тому, что скорость обтекания частиц потоком становится больше фиктивной (без учета влияния частиц) скорости  $W_s$ , такую скорость принято называть истинной  $W$ . Для характеристики крупности и плотности частицы используется понятие скорости витания одиночной частицы  $V_s$ , показывающее фиктивную скорость, при которой одиночная частица пребывает в состоянии равновесия в потоке оживающего агента (при условии, что размер самой частицы пренебрежимо мал по сравнению с сечением аппарата).

Для определения истинной скорости  $w_i$  обтекания частиц оживающим агентом в каждой ячейке используется зависимость:

$$W_i = \frac{W_{S(i)}}{\left[ 1 - \varepsilon_0 \cdot \frac{S_i}{S_{\max(i)}} \right]}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  – начальная порозность;  $S_i$  – объем материала в ячейке с номером  $i$ ;  $S_{\max(i)}$  – максимальный объем материала, который может поместиться в  $i$ -ю ячейку.

Перемещение материала рассматривается через малые конечные промежутки времени  $\Delta t$ , при этом вероятность перехода частицы из ячейки в ячейку пропорциональна истинной скорости ее движения. Безразмерную скорость конвективного переноса частиц можно определить по формуле:

$$v_i = (W_i - V_s) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}. \quad (3)$$

Таким образом, вероятности конвективного перехода частицы вверх ( $p_{fi}$ ) и вниз ( $p_{bi}$ ) связаны с параметрами процесса и скоростью витания фракции следующими зависимостями:

$$p_{bi}=0 \text{ при } W_i - V_s > 0 \text{ и } p_{bi}=v_i \text{ при } W_i - V_s < 0, \quad (4)$$

$$p_{fi}=v_i \text{ при } W_i - V_s > 0 \text{ и } p_{fi}=0 \text{ при } W_i - V_s < 0. \quad (5)$$

В подобных линейных моделях [3] матрица переходных вероятностей  $P$  задается наперед, но такая модель не соответствует реальной картине слоя. В предлагаемой же модели локальная скорость обтекания частиц в каждой ячейке зависит от их концентрации, которая сама формируется с учетом скоростей обтекания, что делает предлагаемую модель нелинейной.

При конвективном переносе твердой фазы перемещение частицы рассматривается только в направлении скорости ее движения, в результате чего слой частиц равномерно расширяется и занимает определенный объем. Однородность слоя в общем случае не достигается в действительности. Полагая, что однородность слоя нарушается из-за наличия стохастиче-

ских перемещений частиц в его объеме, в модели вводится безразмерный дисперсионный коэффициент  $d$ , который по сути является вероятностью стохастического перехода из ячейки в ячейку. Вероятности диффузионных переходов рассчитываются следующим образом:

$$d = D \frac{\Delta t}{\Delta x^2}, \quad (6)$$

где  $D$  – коэффициент макродиффузии.

Очевидно, что учет диффузионного механизма движения частиц необходим не во всем пространстве аппарата, а только между ячейками, которые занимают взвешенный слой (объем слоя рассчитывается по конвективной модели). При этом, в отличие от конвективных вероятностей, стохастические вероятности вводятся не только для переходов в соседнюю ячейку, но и для любых перемещений в рамках слоя. В предположении, что вероятности стохастических переходов подчиняются нормальному распределению, достигая максимума для перехода в соседнюю ячейку и стремясь к нулю для вероятностей перехода в наиболее удаленные от рассматриваемой ячейки, коэффициент  $d$  был распределен по нормальному закону с дисперсией  $\sigma^2$  по всем ячейкам, в которых существует слой.

Матрица переходных вероятностей строится по известному правилу: каждый ее столбец принадлежит определенной ячейке и в нем в строках с номерами ячеек, куда в соответствии с принятой схемой разрешены переходы, размещаются вероятности этих переходов. Ниже показан пример матрицы для аппарата высотой  $n$  ячеек, в котором псевдоожиженный слой занимает  $h$  ячеек (для  $h=3, n=6$ ):

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{s1} & p_{b2} + d_1 & d_2 & 0 & 0 & 0 \\ p_{f1} + d_1 & p_{s2} & p_{b3} + d_1 & 0 & 0 & 0 \\ d_2 & p_{f2} + d_1 & p_{s3} & p_{b4} & 0 & 0 \\ d_3 & d_2 & p_{f3} + d_1 & p_{s4} & p_{b5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{f4} & p_{s5} & p_{b6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{f5} & p_{s6} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что при помощи модели в конвективном варианте может быть достоверно предсказано расширение псевдоожиженного слоя. А конвективно-диффузионный вариант модели позволяет с хорошей степенью достоверности прогнозировать распределение объемной концентрации твердой фазы по высоте псевдоожиженного слоя.

Распределение твердой фазы по высоте цилиндрического псевдоожиженного слоя показано на рисунке 2. Результаты численного и натурального эксперимента показали неравномерность распределения концентраций частиц по высоте аппарата в установившемся режиме работы. Учет этой неравномерности необходим для более высокой степени достоверности расчетов тепло- и массообменных процессов, проводимых в псевдоожиженном слое.

Предлагаемая схема расчета процесса теплообмена между потоком оживающего агента и частицами твердой фазы показана на рисунке 3. Она состоит из двух параллельных цепей ячеек: первая (формирование которой уже было рассмотрено выше) – для частиц, а вторая – для газа.

При наличии теплообмена между газом и частицами происходит поперечная теплопередача между сходственными ячейками цепей и продольный перенос теплоты вместе с частицами и газом вдоль соответствующих цепей. Распределение температуры вдоль цепей может быть описано векторами температур  $T_p$  и  $T_g$ , а векторы текущих запасов теплоты в ячейках рассчитаны как  $Q_p = c_p S \cdot T_p$ ;  $Q_g = c_g S_g \cdot T_g$ , где  $c_p$  и  $c_g$  – теплоемкости частиц и газа,  $S$  и  $S_g$  – содержания частиц и газа в ячейках, в общем случае переменные по высоте слоя, символ « $\cdot$ » означает поэлементное умножение векторов. Эволюция теплового состояния цепей описыва-

ется рекуррентными матричными равенствами, связывающими последовательные состояния цепей через промежуток времени  $\Delta t$ :

$$Q_p^{N+1} = P^N(Q_p^N + \alpha \cdot F \cdot (T_g^N - T_p^N)), \quad (8)$$

$$Q_g^{N+1} = P_g^N(Q_g^N - \alpha \cdot F \cdot (T_g^N - T_p^N) + Q_{gf}), \quad (9)$$

где  $F$  – вектор поверхностей теплообмена в ячейках,  $Q_{gf}$  – вектор подачи теплоты с входящим газом при его температуре  $T_{g0}$ , имеющий один ненулевой элемент  $G_g T_{g0} c_g \Delta t$  для первой ячейки. Матрицы  $P^N$  и  $P_g^N$  описывают продольное перемещение частиц и газа и их теплоты вдоль цепей. В матрице  $P^N$  содержатся вероятности переходов в течение  $\Delta t$  из данной ячейки во все другие ячейки цепи, в матрице  $P_g^N$  – доли газа, переносимого в течение этого времени в соседние по ходу ячейки.

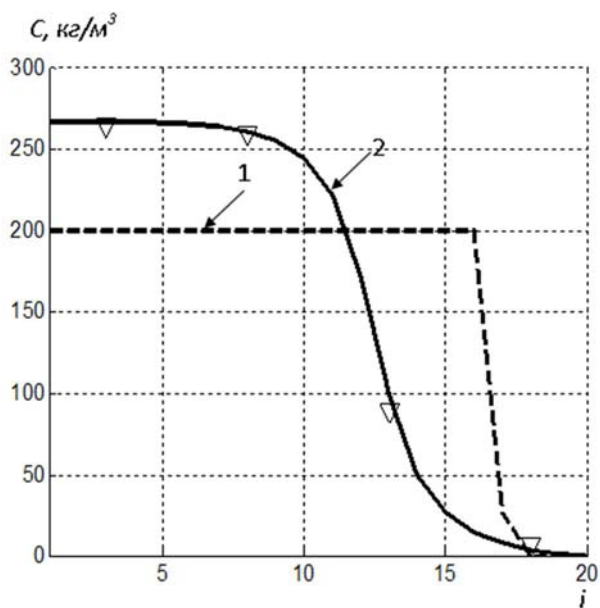


Рисунок 2 – Профили концентрации твердой фазы по высоте псевдооживленного слоя. Точки – экспериментальные значения концентраций, кривая 1 –  $D=0 \text{ м}^2/\text{с}$ ; 2 –  $D=2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$

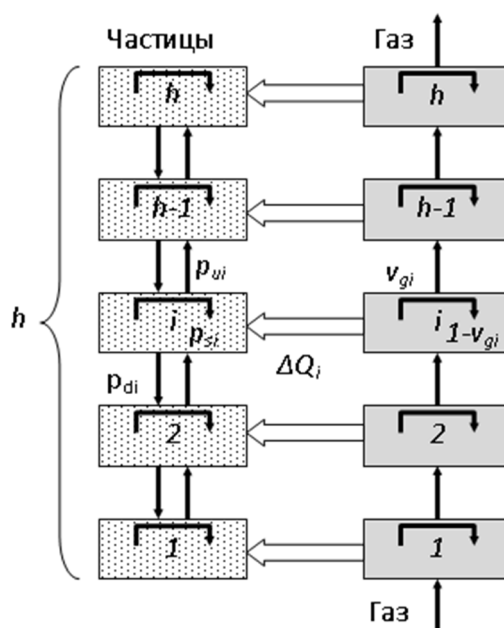


Рисунок 3 – Расчетная схема процесса теплообмена

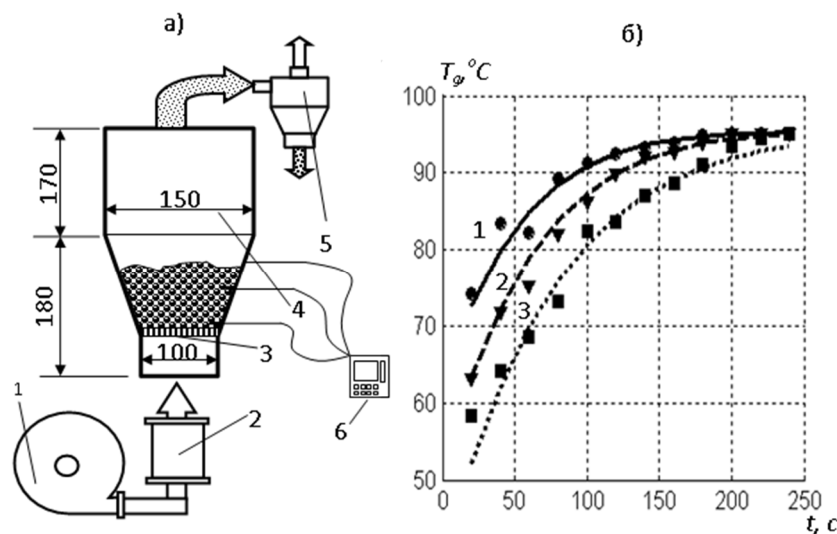
Поскольку равенства (8), (9) отражают очевидные уравнения баланса, то получаемые по ним решения всегда будут правдоподобными. Количественная же достоверность расчетных

прогнозов напрямую зависит от достоверности определения коэффициентов теплоотдачи в ячейках, которые меняются по высоте слоя.

Экспериментальное исследование внутреннего теплообмена в псевдооживленном слое проводилось на лабораторной установке, схема и основные размеры которой показаны на рисунке 4, а. Аппарат состоял из верхней цилиндрической и нижней конической части с углом раскрытия  $8^\circ$  на сторону. Предварительно аппарат путем подачи нагретого воздуха прогревался до установившейся температуры. Затем на решетку мгновенно засыпалась навеска зернистого материала, и начиналось измерение с интервалом времени 20 с температуры газа термомпарами, расположенными на высоте 10, 50 и 75 мм над решеткой.

Высота неподвижного слоя материала составляла 45 мм, а во взвешенном состоянии – 75 мм. Замеры температуры продолжались до полной стабилизации температуры слоя, равной температуре подаваемого подогретого до  $95^\circ\text{C}$  воздуха.

Результаты расчетного и экспериментального исследования переходного процесса прогрева слоя показаны на рисунке 4, б, где линии соответствуют расчетной кинетике прогрева, а точки – экспериментальным данным.



**Рисунок 4 – Схема и основные размеры экспериментальной установки (а):**  
 1 – воздуходувка; 2 – электрокалорифер; 3 – газораспределительная решетка;  
 4 – аппарат с псевдооживленным слоем; 5 – циклон; 6 – устройство для измерения  
 и контроля температуры; б – изменение температуры воздуха в различных сечениях  
 слоя: 1 – 10 мм, 2 – 50 мм, 3 – 75 мм

При моделировании использовалось эмпирическое соотношение [4]:

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,991}, \tag{10}$$

где  $Re = W_r \delta / \nu$  – критерий Рейнольдса ( $W_r$  – локальная скорость обтекания частиц газом, разная в разных ячейках;  $\delta$  – средний диаметр оживжаемой фракции;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости газа);  $Nu = \alpha \delta / \lambda$  – критерий Нуссельта ( $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности).

Из графиков видно, что эта зависимость обеспечивает хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных, с одной стороны, и не является следствием разработанной модели с другой. Поэтому предлагаемая математическая модель с эмпирической зависимостью для расчета коэффициента теплоотдачи (10) может рассматриваться как достоверная научная основа компьютерного метода расчета псевдооживленного слоя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахундов, А.А. Обжиг в кипящем слое в производстве строительных материалов [Текст] / А.А. Ахундов, Г.А. Петрихина, А.М. Полинковская, В.Л. Пржецлавский. – М.: Стройиздат, 1975. – 248 с.



2. Сулименко, Л.М. Технология минеральных вяжущих материалов и изделий на их основе [Текст] / Л.М. Сулименко. – М.: Высш. шк, 2000. – 303 с.

3. Алоян, Р. М. Теоретические основы математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных материалов [Текст] / Р.М. Алоян, С.В. Федоров, В.Е. Мизонов. – Иваново: «ПресСто», 2011. – 256 с.

4. Овчинников, Л.Н. Моделирование процесса сушки минеральных удобрений во взвешенном слое [Текст] / Л.Н. Овчинников // Изв. Вузов «Химия и химич. технология». – Т. 52, вып. 7, 2009. – С. 122-124.

**Огурцов Валерий Альбертович**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново

Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика»

Тел.: +7 962 156 69 08

E-mail.: ogurtzovvawork@mail.ru

**Огурцов Антон Валерьевич**

Ивановский государственный энергетический университет, г. Иваново

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика»

Тел.: +7 905 107 35 06

**Митрофанов Андрей Васильевич**

Ивановский государственный энергетический университет, г. Иваново

Кандидат технических наук, ассистент кафедры «Прикладная математика»

E-Mail.: and2mit@mail.ru

**Алешина Анна Павловна**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново

Аспирантка кафедры «Строительная механика»

Тел.: +7 909 248 11 63

E-mail.: annaricci89@mail.ru

---

OGURTZOV V.A., OGURTZOV A.V., MITROFANOV A.V.,  
ALESHINA A.P.

**A NON-LINEAR CELL MODEL OF FLUIDIZATION  
IN THE TECHNOLOGY OF CONSTRUCTION MATERIALS  
PRODUCTION**

*A non-linear cell mathematical model of hydrodynamic and heat process in a reactor with fluidized bed is proposed. The model allows calculating the bed expansion, the particle content and local velocity of flow around distribution over the bed height as well as heat exchange between particles and gas. The model computational results are in good coincidence with experimental data.*

***Keywords:** fluidized bed, cell model, state vector, matrix of transition probabilities, distribution of particle content*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Ahundov, A.A. Obzhig v kipjavem sloe v proizvodstve stroitel'nyh materialov [Tekst] / A.A. Ahundov, G.A. Petrihina, A.M. Polinkovskaja, V.L. Przheclavskij. – М.: Strojizdat, 1975. – 248 s.

2. Sulimenko, L.M. Tehnologija mineral'nyh vjazhuvih materialov i izdelij na ih osnove [Tekst] / L.M. Sulimenko. – М.: Vyssh. shk, 2000. – 303 s.

3. Alojan, R. M. Teoreticheskie osnovy matematicheskogo modelirovanija mehanicheskix i teplovyh processov v proizvodstve stroitel'nyh materialov [Tekst] / R.M. Alojan, S.V. Fedorov, V.E. Mizonov. – Ivanovo: «PresSto», 2011. – 256 s.

4. Ovchinnikov, L.N. Modelirovanie processa sushki mineral'nyh udobrenij vo vzveshennom sloe [Tekst] / L.N. Ovchinnikov // Izv. Vuzov «Himija i himich. tehnologija». – Т. 52, vyp. 7, 2009. – С. 122-124.

**Ogyrtzov Valery Albertovich**

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo

Doctor of technical science, professor of department «Building mechanics»

Ph.: 7 962 156 69 08

E-mail.: ogurtzovvawork@mail.ru

**Ogyrtzov Anton Valeryevich**

Ivanovo state power university, Ivanovo

Candidate of technical sciences, senior lecturer of department «Applied mathematics»

Ph.: +7 905 107 35 06

**Mitrofanov Andrey Vasilevich**

Ivanovo state power university, Ivanovo

Candidate of technical sciences, senior lecturer of department «Applied mathematics»

E-mail: and2mit@mail.ru

**Aleshina Anna Pavlovna**

Ivanovo state architecturally-building university, Ivanovo

Post-graduate student

Ph.: 7 909 248 11 63

E-mail.: annaricci89@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 вверху – 2 см.
- Статья предоставляется в **1 экземпляре** на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного автора**, включая соавторство.
- **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.**
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует 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 средний объем – 500 печатных знаков;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

**С полной версией требований к оформлению научных статей**  
**Вы можете ознакомиться на сайте [www.gu-unprk.ru](http://www.gu-unprk.ru)**

---

**Положение**  
**о рецензировании рукописей статей, поступающих в редакцию журнала**  
**«Строительство и реконструкция»**

1. В качестве рецензентов рукописей статей, поступающих для публикации в журнале «Строительство и реконструкция», привлекаются известные специалисты в данной предметной области и имеющие в течение последних пяти лет публикации в рецензируемых источниках по рассматриваемой тематике.

2. К рецензированию рукописей статей привлекаются специалисты с соответствующей или более высокой ученой степенью.

3. В рецензии на соответствующую рукопись статьи рецензент обязан определить:

- актуальность и соответствие статьи тематике журнала;
- научный уровень и новизну представляемых для публикации результатов, их практическую значимость;
- достоинства и недостатки по содержательной части и форме изложения материала;
- конкретные рекомендации по доработке или сокращению материала статьи;
- возможность (или невозможность) опубликования рецензируемой статьи в журнале «Строительство и реконструкция».

4. Рецензия в виде твердой копии (два экземпляра) и в электронной форме представляются в редакцию журнала в сроки, устанавливаемые аппаратом редакции.

5. Твердая копия рецензии, подготовленной сотрудником сторонней организации, подписывается рецензентом, а подпись заверяется печатью организации.

6. При поступлении в редакцию журнала положительных (или отрицательных) рецензий на рассматриваемую статью, с ней знакомится один из членов редколлегии, который представляет рассматриваемую статью вместе с рецензией на заседании редколлегии, где принимается решение о ее опубликовании в журнале или отклонении.

7. Дальнейшая работа с рукописью, принятой к публикации, осуществляется аппаратом редакции в соответствии с технологическим процессом подготовки номера.

8. Отрицательные рецензии направляются авторам. Анонимность рецензентов гарантируется редакцией журнала.

9. Рукописи, подлежащие доработке, направляются аппаратом редакции авторам вместе с текстом рецензии, содержащим конкретные рекомендации по доработке статьи. Авторство рецензии также не раскрывается.

10. Рукопись статьи, поступившая после доработки, вместе с ответом авторов направляется рецензенту для ознакомления и дополнительного рецензирования. Рецензент должен в установленные сроки представить в редакцию повторную рецензию, на основании которой редколлегия принимает решение о приеме статьи или ее отклонении.

11. По рукописям статей, отклоненным на заседании редколлегии, аппарат редакции высылает авторам извещение с формулировкой: «Отклонено по решению Редколлегии журнала» с кратким обоснованием, например, «статья не соответствует тематике журнала», «статья не прошла по конкурсу» и т.д.

**PROVISIONS**  
**on the evaluation of manuscript papers submitted to**  
**Building and reconstruction journal**

1. The journal involves well-known experts in the subject area as reviewers of the manuscripts submitted for publication, who have publications on the subject matter of the journal in peer-reviewed sources over the last five years.

2. For the evaluation the journal involves experts having the same or higher scientific degree.

3. During the evaluation the reviewer must determine:

- relevance and compliance of an article with the journal subject area;
- scientific level and novelty of a work submitted for publication and its practical significance;

- the advantages and disadvantages of the article content and structure;

- specific recommendations for revision or reduction of the article material;

- the possibility (or impossibility) of publication of an evaluated article in the journal.

4. Expert evaluation of an article returns to the journal at the time fixed by editorial management group in forms of hard copy (two paper copies) and electronic copy.

5. Hard copy of the evaluation prepared by a third party shall be signed by the reviewer, and the signature shall be certified by the organization seal. If the reviewer is an employee of State University ESPC the stamp certifying the signature is not required.

6. Upon receiving a positive (or negative) evaluation of an article by the Editor Board, one of Editorial Board members examines it and then presents it along with the expert evaluation at the meeting of Editorial Board at which a decision on its publication or rejection is made.

7. Further work with the manuscript submitted for publication is carried out by editorial work group in accordance with the technological process of issue preparation.

8. Negative evaluation is sent to authors. Anonymity is guaranteed by the Editorial Board.

9. Manuscripts which require improvements are sent to authors along with evaluation containing specific recommendations on the revision of the article. Authorship of the evaluation will not be disclosed.

10. Manuscripts submitted after revision along with the reply of the author are sent to the reviewer for further evaluation. The reviewer should provide an evaluation after revision to the Editor at the stated time, based on which the editorial board makes a decision on acceptance or rejection of an article.

11. Authors of rejected manuscript receive notice saying «Rejected by the decision of the Editorial Board» with a brief explanation, such as «the article does not correspond to the subject-matter of the journal», «the article was not selected from among other candidates» and etc.

**ПАМЯТКА**  
**рецензенту научного журнала**  
**«Строительство и реконструкция»**

*Все статьи, поступающие в редакцию журнала проходят обязательное рецензирование.  
Рецензентами статей являются ведущие специалисты в строительной области.*

Начало рецензии должно быть оформлено по следующему образцу:

**Рецензия на статью**

Автор (ы) \_\_\_\_\_

Название \_\_\_\_\_

В рецензии должны быть прокомментированы основные положения статьи, дана обобщенная аргументированная оценка и сделаны выводы о научной значимости работы и возможности ее опубликования в журнале «Строительство и реконструкция».

При рецензировании оцениваются следующие аспекты:

- соответствие тематике журнала;
- постановка проблемы в общем виде;
- выделение нерешенных частей общей проблемы;
- изложение результатов исследования;
- последовательность (логичность) изложения;
- грамотность изложения;
- компактность и наглядность иллюстративного материала;
- грамотное использование научных терминов;
- оригинальность и новизна результатов исследований;
- теоретическое и практическое значение работы.

Заключение:

- а) рекомендовать статью к опубликованию в журнале «Строительство и реконструкция»;
- б) рекомендовать статью к опубликованию в журнале после доработки;
- в) статья не рекомендуется к публикации (причина: не соответствие тематике журнала, отсутствие научных и прикладных результатов и др.)/

Рецензент \_\_\_\_\_  
(ученая степень, фамилия, подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ года

Результат рецензирования необходимо отправить в редакцию журнала по e-mail: oants@mail.ru, а оригинал (с указанием ученой степени, фамилии рецензента и его подписью, а также даты) обычной почтой в двух экземплярах по адресу: 302020, Орел, Наугорское шоссе, д. 29. Редакция журнала «Строительство и реконструкция».

*Адрес учредителя журнала*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет –  
учебно-научно-производственный комплекс»  
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)  
302020, г. Орел, ул. Наугорское шоссе, 29  
+7 (4862) 42-00-24  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: unpk@ostu.ru

*Адрес редакции*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет –  
учебно-научно-производственный комплекс»  
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)  
302020, г. Орел, ул. Московская, 77.  
+7 (4862) 73-43-49  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: oantc@mail.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор С.В. Солопов  
Компьютерная верстка С.В. Солопов

Подписано в печать 28.08.2012 г.

Формат 70×108 1/16. Печ. л. 4,94.

Тираж 400 экз.

Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической  
базе ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.