

# СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

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

*Редакционный совет:*

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

*Главный редактор:*

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

*Заместители главного редактора:*

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

*Редколлегия:*

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

*Ответственный за выпуск:*  
Соловьев 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: str\_and\_rek@mail.ru

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

Подписной индекс 86294 по объединенному  
каталогу «Пресса России»

© ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2014

## Содержание

### Теория инженерных сооружений.

#### Строительные конструкции

Горностаев И.С. Анализ и результаты экспериментальных и численных исследований деформативности железобетонных составных балок.....	3
Завьялова О.Б., Шеин А.И. Расчёт быстровозводимых монолитных железобетонных каркасов с учётом физической нелинейности, твердения и ползучести бетона.....	11
Курбакий Е.Н., Нгуен Ван Хунг. Определение скоростей распространения волн напряжений в гранулированных сухих и водонасыщенных средах....	17
Орлович Р.Б., Зимин С.С., Рубцов Н.М. О работе облицовочного каменного слоя наружных стен каркасно-монолитных зданий при силовых воздействиях.....	26
Турков А.В., Марфин К.В. Методика проведения эксперимента для статического и динамического испытания изотропных составных пластин на податливых связях.....	31

### Архитектура и градостроительство

Васильев А.В. Проблема облучения радоном в современных многоэтажных зданиях.....	37
Иващук О.А., Кванин Д.А. Поддержка принятия решений в сфере управления экологической безопасностью дворовых территорий.....	45

### Строительные материалы

#### и технологии

Илиополов С.К., Леконцев Е.В., Чернов С.А., Каклюгин А.В. Модифицированная вибролитая асфальтобетонная смесь с повышенной устойчивостью к термоокислительному старению.....	53
Подгорнов Н.И., Коротеев Д.Д. Влияние толщины воздушной прослойки на формирование температуры бетона при твердении в опалубочных формах с прозрачным покрытием.....	60
Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Виталова Н.М. Ингибирование коррозии железобетонных конструкций.....	65
Федоров С.С., Чернецкая И.Е. Автоматизированная система управления процессом теплоснабжения промышленных предприятий.....	72



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

**№4 (54) 2014**  
**(July-August)**

# BUILDING AND RECONSTRUCTION

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

## *Editorial council:*

**Golenkov V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof., president  
**Radchenko S.Y.** Doc. Sc. Tech., Prof., vice-president  
**Borzenkov M.I.** Candidat Sc. Tech., Assistant Prof.  
**Astafichev P.A.** Doc. Sc. Law., Prof.  
**Ivanova T.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Kirichek A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Kolchunov V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Konstantinov I.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Novikov A.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Popova L.V.** Doc. Ec. Tech., Prof.  
**Stepanov Y.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## *Editor-in-chief*

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

## *Editor-in-chief assistants:*

**Danilevich D.V.** Candidat Sc. Tech., Assistant Prof.  
**Kolesnikova T.N.** Doc. Arc., Prof.  
**Korobko V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## *Editorial committee*

**Bock T.** Doc. Sc. Tech., Prof. (**Germany**)  
**Bondarenko V.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Gordon V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Emelyanov S.G.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Karpenko N.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Klueva N.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Korobko A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Korol E.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Rimshin V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Sergeychuk O.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (**Ukraine**)  
**Serpik I.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Sikora Z.** Doc. Sc. Tech., Prof. (**Poland**)  
**Tamrazyan A.G.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Tur V.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (**Belorussia**)  
**Turkov A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Fyodorov V.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Chernyshov E.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Schach R.** Doc. Sc. Tech., Prof. (**Germany**)

## *Responsible for edition:*

**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: oantc@ostu.ru

Journal is registered in Russian federal service  
for monitoring communications, information  
technology and mass communications  
The certificate of registration:  
ПИ № ФС77-47354 from 03.04.11 г.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»  
86294

© State University ESPC, 2014

## Contents

### **Theory of engineering structures.**

#### **Building units**

<b>I. Gornostaev.</b> Analysis and results of experimental and numerical study of deformation of composite concrete beams.....	3
<b>O. Zav'yalova, A. Shein.</b> The rapidly erected monolithic concrete frame calculation taking into account the physical nonlinearity, concrete hardening and creep.....	11
<b>E. Kurbatskiy, Nguyen Van Hung.</b> Determination of stress wave speed in granular dry and water-saturated media.....	17
<b>R. Orlovich, S. Zimin, N. Rubtsov.</b> Work stone facing layer of external multi-layer walls of frame-monolithic multi-story building at force effects.....	26
<b>A. Turkov, K. Marfin.</b> The experimental technique for static and dynamic tests isotropic composite plates on pliable links.....	31

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

<b>A. Vasilyev.</b> Indoor radon problem in modern multi-story dwellings.....	37
<b>O. Ivashchuk, D. Kvanin.</b> Support decision-making in environmental control on the domestic territories.....	45

### **Construction materials and technologies**

<b>S. Iliopolov, E. Lekontsev, S. Chernov, A. Kaklugin.</b> Modified vibrocasting asphalt concrete mixture with a higher resistance to oxidative aging.....	53
<b>N. Podgornov, D. Koroteev.</b> The influence of air layer's thickness on concrete's temperature formation during maturing in shuttering forms with transparent covering.....	60
<b>V. Rumyantseva, V. Konovalova, N. Vitalova.</b> Corrosion inhibition of reinforced concrete structures.....	65
<b>S. Fedorov, I. Chernetskaya.</b> Automated control system for process heat supplies of the industrial enterprises.....	72

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ.

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.012.045

ГОРНОСТАЕВ И.С.

### **АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕФОРМАТИВНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СОСТАВНЫХ БАЛОК\***

*Проведен анализ и представлены некоторые результаты экспериментальных и численных исследований деформативности железобетонных составных балок. Получены новые данные о жесткости по всей длине конструкций и в пролете «среза», ширине раскрытия нормальных и наклонных трещин на уровне осей продольной и поперечной растянутой арматуры и вдоль всего профиля трещины, а также данные об изменении расстояния между трещинами и длине трещин по мере увеличения нагрузки, наличия эффекта нарушения сплошности и других параметров в зоне наклонных трещин.*

**Ключевые слова:** железобетон, составные конструкции, экспериментальные исследования, деформативность, наклонные трещины.

В настоящее время в связи с коренным изменением требований к энергосбережению увеличению объемов реконструкции и другими нововведениями, преимущества железобетонных составных конструкций становятся очевидными. В этой связи возрастаёт потребность углубленного исследования особенностей их сопротивления. Одной из нерешенных задач является уточнение параметров жесткости составных железобетонных конструкций по их длине после образования наклонных трещин в припорочных зонах.

Проведенные [1, 2] лабораторные исследования жесткости и трещиностойкости железобетонных составных конструкций (18 железобетонных конструкций, включающих два пролета «среза», т.е. всего 36 опытов, разделенных на пять серий) по наклонным сечениям ставили целью проверку предлагаемого расчетного аппарата, основанного на учете деформационного эффекта, а также разработку рекомендаций по проектированию эффективных железобетонных составных конструкций.

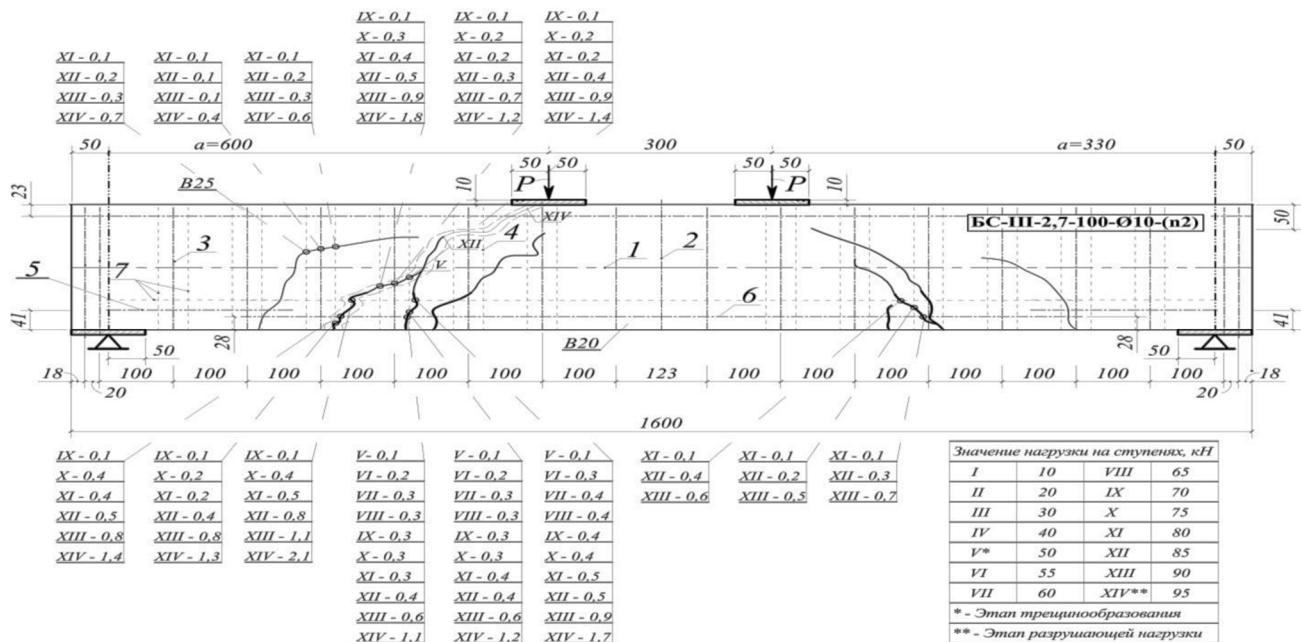
Основными параметрами, за которыми велись наблюдения в процессе эксперимента, являлись картины образования, раскрытия и развития трещин при соответствующих уровнях нагрузки, характер разрушения и величина разрушающей нагрузки, а также значения прогибов на соответствующих ступенях нагружения. Весьма информативными в этом отношении можно рассматривать картины трещин (рис. 1), зарисованных во время эксперимента на специальных планшетах, показания электротензорезисторов и мембранных розеток, а также графики средних деформации сжатого бетона и растянутой арматуры (рис. 2). Раскрытие трещин на рисунке 1 в виде цифр обозначает: первая цифра – ступень нагружения; цифра после тире – ширина раскрытия трещин (мм). В таблице к рисунку приведены значения нагрузки (кН) на соответствующих ступенях нагружения.

Анализом полученных значений ширины раскрытия трещин на уровне оси арматуры и на расстоянии двух-трех диаметров от этой оси установлено, что арматура сдерживает раскрытие трещины, противодействуя раскрытию ее берегов.

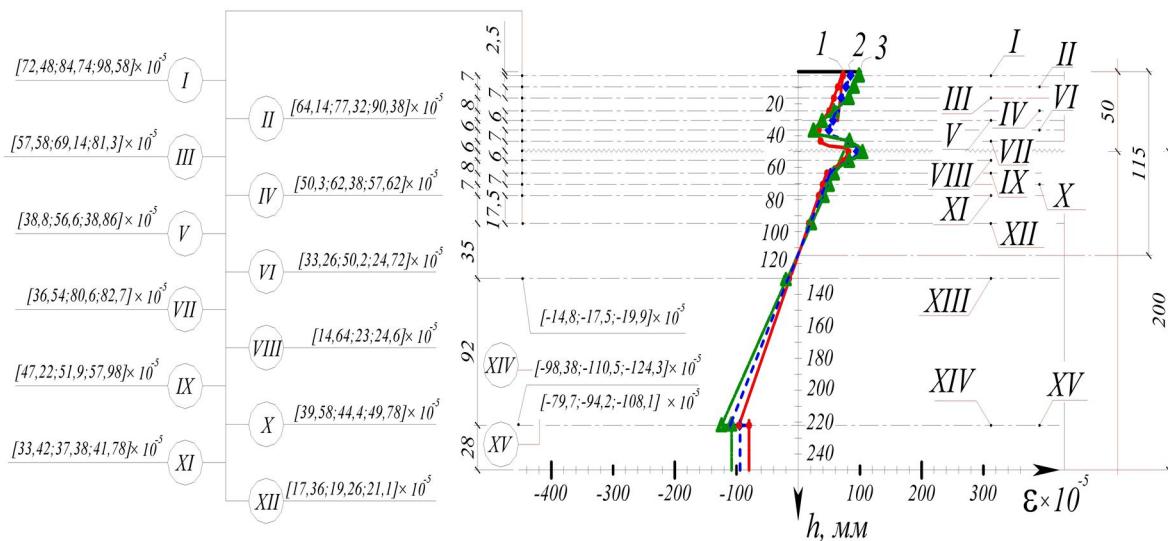
Возникающие при этом реакции вызывают местное сжатие в бетоне в окрестности трещины в околоарматурной зоне – эффект нарушения сплошности или деформационный эффект. Одновременное действие  $M$ ,  $Q$  и наличие мощной растянутой арматуры приводят к то-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта президента РФ для молодых ученых 14.124.13.6533-МД.

му, что трещины имеют максимальное раскрытие не на уровне оси арматуры, а в некоторой зоне, отстоящей от оси арматуры на два-три диаметра (между нейтральной осью и осью растянутой арматуры) выше оси растянутой арматуры или в зоне нейтральной оси между хомутами. Движение наклонной трещины идет по двум направлениям: в сторону сжатой грани бетона и в сторону продольной растянутой арматуры. При этом на пересечении с хомутами ширина раскрытия трещин меньше, чем на некотором (порядка двух диаметров) удалении от хомутов. Аналогичные опытные данные были получены для всех серий испытанных опытных образцов.



*Рисунок 1 – Схема образования и раскрытия трещин в опытной конструкции третьей серии БС-III-2,7-100-Ø10-(n2): 1 – средняя нейтральная ось; 2 – вертикальная ось симметрии образца; 3 – поперечные хомуты диаметром 6 мм из стали A240C; 4 – поперечные хомуты диаметром 10 мм из стали A240C; 5 – геометрические оси нижней рабочей арматуры в приопорной зоне 2Ø10A400C; 6 – геометрические оси нижней рабочей арматуры в середине балки 2Ø16A400C; 7 – дополнительные оси для замера трещин, смещенные от осей арматуры на расстояние двух диаметров*



*Рисунок 2 – Графики деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры в поперечном сечении опытной железобетонной конструкции БС-III-2,7-150-d10(п2), проходящем в зоне приложения сосредоточенных сил 1-1: I-XIV – оси баз электромензорезисторов, расположенных на бетоне, XV – то же, на арматуре; 1 – на ступени нагружения 0,6Р<sub>н</sub>; 2 – то же – 0,7Р<sub>н</sub>; 3 – то же – 0,8Р<sub>н</sub>*

Информативными являются и графики средних деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры в поперечном сечении опытных образцов, проходящем в зоне приложения сосредоточенных сил (см. рис. 2), которые построены на основе показаний электротензорезисторов и механических приборов с ценой деления 0,002 мм. Кроме опытных данных о деформациях сжатого бетона и растянутой арматуры на соответствующих ступенях нагружения эти графики дают возможность получить фактическую высоту сжатой зоны и оценить возможность использования для исследуемых конструкций гипотезы плоских сечений для средних деформаций бетона и арматуры. База механических приборов ( $l = 250$  мм) в опытах была соизмерима с расстоянием между трещинами при эксплуатационном уровне нагружения.

Анализ графиков деформаций бетона и арматуры позволяет говорить о целесообразности использования гипотезы плоских сечений в пределах каждого из составляющих стержней для средних деформаций бетона и арматуры в железобетонных составных конструкциях на всем диапазоне их нагружения. Важно также отметить, что для железобетонных составных конструкций в зоне шва между разными бетонами происходят возмущения деформаций (см. рис. 2). Это возмущение можно аппроксимировать условным сосредоточенным сдвигом при экстраполяции гипотезы плоских деформаций каждого слоя в местных зонах, прилегающих к шву.

Для опытной конструкции первой серии БС-I-1,5-150-Ø6 (растянутая арматура Ø16A400C) трещины образовались в зоне нейтральной оси и развивались как в направлении к верхней грани, так и в направлении к продольной растянутой арматуре. При этом максимальное раскрытие наклонных трещин на уровне оси рабочей продольной арматуры составляло на XI ступени нагружения (0,7 от разрушающей) 0,23 мм, а на удалении 2 диаметров арматуры – 0,36 мм соответственно.

Для опытной конструкции третьей серии БС-III-2,7-100-Ø10-(n2) (растянутая арматура Ø16A400C) трещины образовались также в зоне нейтральной оси и развивались как в направлении к верхней грани, так и в направлении к продольной растянутой арматуре. При этом максимальное раскрытие наклонных трещин на уровне продольной оси поперечной арматуры составляло на X ступени нагружения (0,79 от разрушающей) 0,2 мм, а на удалении 2 диаметров арматуры – 0,3 мм соответственно.

Картина образования и развития трещин приведена на рисунке 1. Раскрытие трещин показано в виде двух цифр: первая цифра – ступень нагружения, вторая – ширина раскрытия. Здесь имеют место три наклонные трещины, образующие веер I. Первая трещина, прилегающая к силе, появилась на пятой ступени нагружения. Вторая трещина появилась на девятой ступени нагружения (она же в последствии стала разрушающей). Третья наклонная трещина, расположенная со стороны опоры, появилась на одиннадцатой ступени нагружения.

Вторая наклонная трещина, подойдя к шву, соединилась с горизонтальной трещиной, образовавшейся вдоль шва на двенадцатой ступени (см. рис. 1).

Анализируя графики экспериментальных зависимостей  $a_{crc} - P / P_u$  (рис. 3-5), можно отметить, что для всех серий ширина раскрытия трещин возрастала с увеличением уровня нагружения, несмотря на то, что с увеличением напряжений в арматуре происходит одновременное уменьшение расстояния между трещинами. При учете многоуровневого процесса образования трещин можно было ожидать уменьшение ширины раскрытия трещин, так как, несмотря на увеличение уровня нагружения и роста напряжений в арматуре, в процессе трещинообразования происходит уменьшение расстояния между трещинами (изменение расстояния между трещинами происходит дискретно обратно пропорционально изменению изгибающих моментов), которое носит противоположный характер влияния на ширину раскрытия трещин. Однако в опытах этого не произошло.

Эти данные ставят весьма конкретное требование к предлагаемой расчетной методике: расчет хотя бы качественно должен подтвердить эту закономерность, замеченную в опыте. Важным является также полученный по тензодатчикам результат о том, что в пределах эксплуатационной нагрузки (0,6-0,8 от разрушающей) высота сжатой зоны бетона практически не изменяется. Результаты обработки электротензометрических цепочек и розеток, установленных на основные образцы и составные призмы, позволили получить следующие опытные зна-

чения коэффициента жесткости шва  $\xi$ : для швов между бетонами В20/В30 –  $\xi = 1982,2 \text{ кН}/\text{см}^2$ ; для швов между бетонами В30/В30 –  $\xi = 2528,5 \text{ кН}/\text{см}^2$ .

Таким образом, проведенные лабораторные испытания опытных конструкций всех серий подтвердило многоуровневую схему трещинообразования, согласно которой трещины образуются на всем диапазоне нагружения вплоть до разрушения. Для всех испытанных балок получены картины трещин, аналогичные показанной на рисунке 1, и построены графики экспериментальной зависимости  $a_{crc} - P / P_u$  составных железобетонных конструкций в зависимости от уровня нагружения.

Перед образованием первой трещины на графике зависимости прогиба от нагрузки (рис. 6) в опытной конструкции первой серии БС-I-1,5-150-06 имеет место резкий перелом, характеризующий переход при смене условий равновесия.

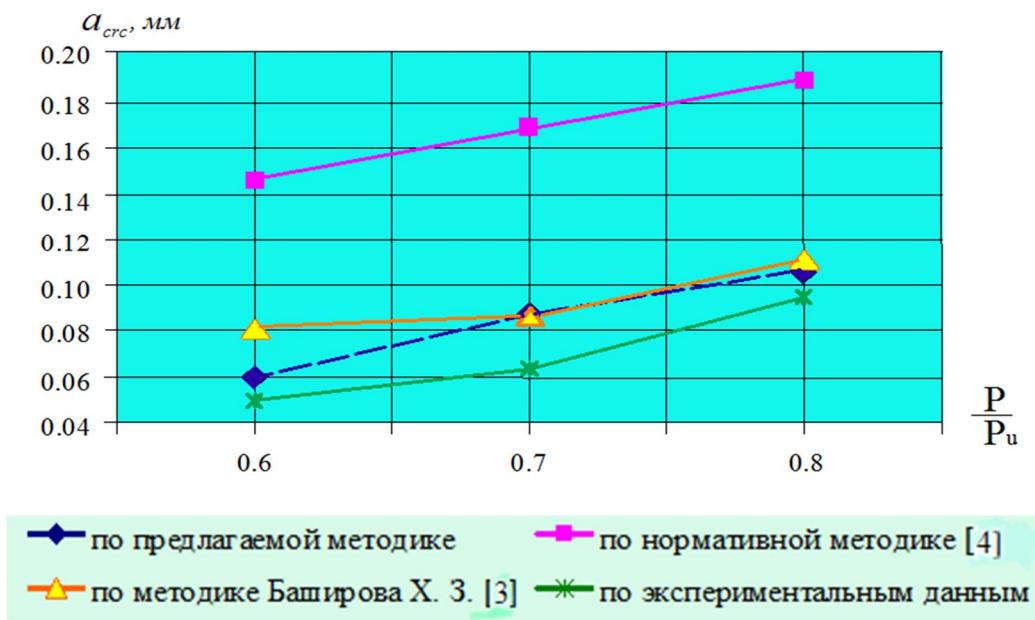


Рисунок 3 – Графики зависимости « $a_{crc} - P / P_u$ » для конструкции пятой серии БС-V-2-100-06

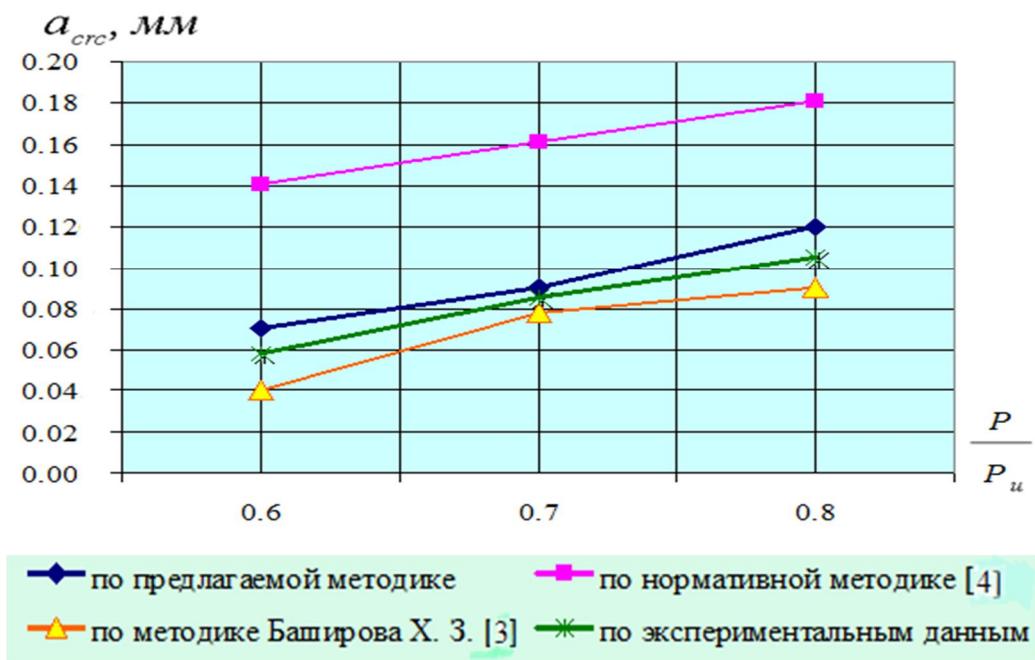


Рисунок 4 – Графики зависимости « $a_{crc} - P / P_u$ » для конструкции второй серии БС-II-2,7-100-06

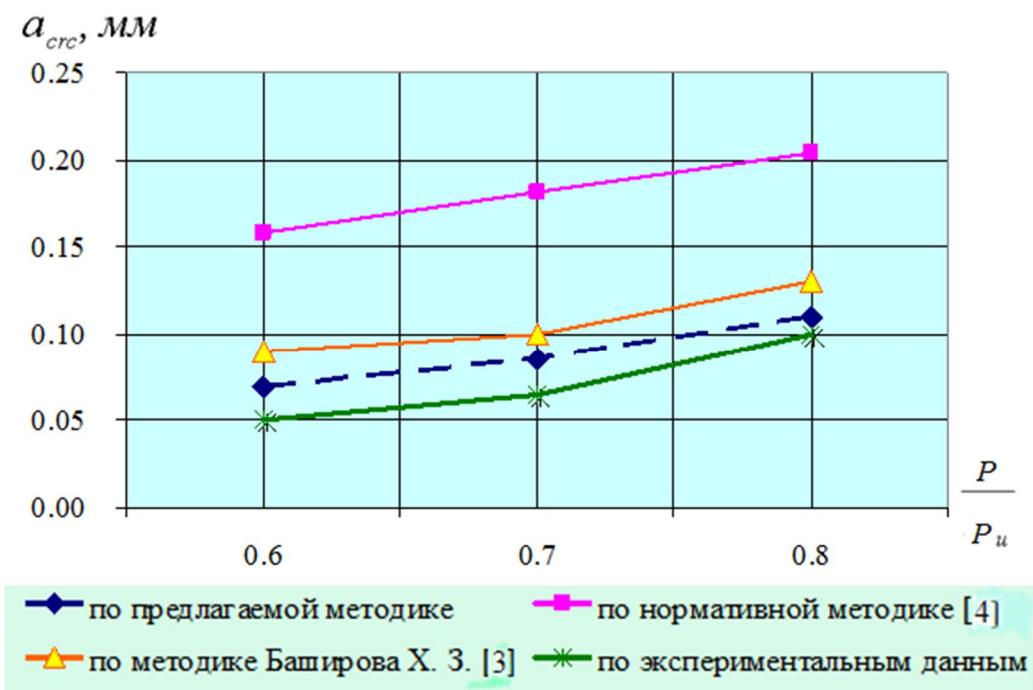


Рисунок 5 – Графики зависимости « $a_{crc} - P / P_u$ » для конструкции первой серии БС-I-1,5-150-Ø6

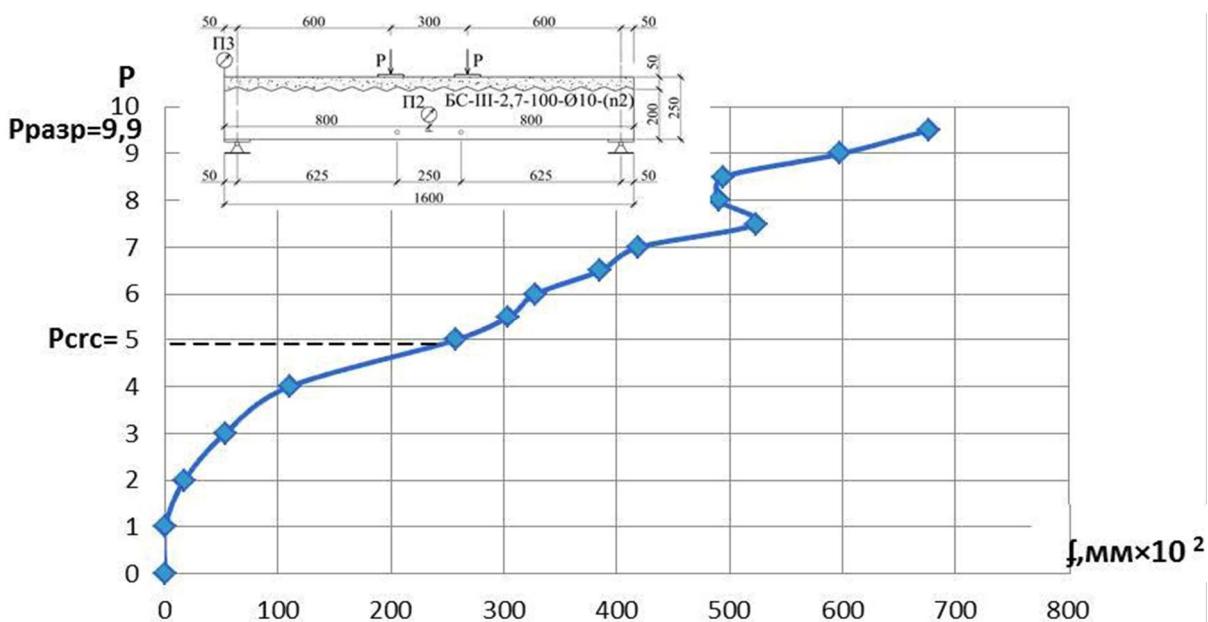


Рисунок 6 – График зависимости прогиба (мм) от нагрузки в ( $\text{kH} \times 10^{-1}$ ) в опытной конструкции третьей серии БС-III-2,7-100-Ø10-(n2)

Видимая трещина с помощью микроскопа была обнаружена через ступень после образования этого перелома. Таким образом, график «нагрузка – прогиб» достаточно точно характеризует момент образования трещин в железобетонной составной конструкции.

Перед разрушением на графике зависимости прогиба в опытной конструкции третьей серии БС-III-2,7-100-Ø10-(n2) от нагрузки имеет место характерный скачок, также характеризующий переход при смене условий равновесия. Разрушение конструкции произошло через ступень после образования этого скачка. Таким образом, скачок на графиках «нагрузка – прогиб» наиболее точно характеризует момент начала разрушения в железобетонной составной конструкции при образовании трещины в шве между бетонами.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены следующие основные опытные параметры: ширина раскрытия трещин на уровне оси продольной и поперечной растянутой арматуры и в смежных зонах над растянутой арматурой ( $a_{crc}$  вдоль профиля трещины); изменения расстояния между трещинами  $l_{crc}$  (функционального и уровневого), длины трещин  $h_{crc}$  по мере увеличения нагрузки, средние деформации продольной и поперечной арматуры в трещине и между трещинами с учетом эффекта нарушения сплошности, несовместные деформации бетона и арматуры, продольные деформации бетонов в зоне шва их контакта, фибрьовых деформаций сжатого бетона и деформации бетона в пределах сжатой зоны, при варьировании разных пролетов «среза», диаметра и шага хомутов. Эти экспериментальные данные предоставляют возможность проверки предлагаемого расчетного аппарата по определению жесткости и деформативности и принятых основных рабочих гипотез, касающихся введения условных сосредоточенных сдвигов в шве между бетонами, несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона при варьировании разных классов бетона и армирования [5].

По разработанной методике с учетом результатов анализа экспериментальных исследований был разработан алгоритм расчета и выполнены численные исследования для выявления скрытых возможностей рационального армирования составных железобетонных конструкций, «невидимых» при использовании существующих методов расчета.

Алгоритм расчета жесткости железобетонных конструкций на участках с наклонными трещинами включает следующие основные этапы:

1. На участках совместного действия  $M$ ,  $N$  и  $Q$  с использованием уравнений трещинообразования устанавливается количество уровней наклонных трещин, определяются расстояния между ними вдоль оси продольной и поперечной рабочей арматуры и ширина их раскрытия, и на боковую поверхность наносится схема трещин разных типов (в первую очередь трещин с максимальной шириной раскрытия).

2. Выполняется расчет образовавшихся после трещинообразования арок и балок переменного сечения по известным формулам строительной механики. При этом в пределах поперечного сечения каждой конструкции перпендикулярно к ее физической оси используется гипотеза плоских деформаций; интенсивность деформаций укорочения ( $\varepsilon_{b,i}$ ) не должна превышать предельных ( $\varepsilon_{bu}$ ). В противном случае происходит разрушение стенки железобетонной конструкции по бетону. В продольной и поперечной арматуре определяется величина «нагельного эффекта».

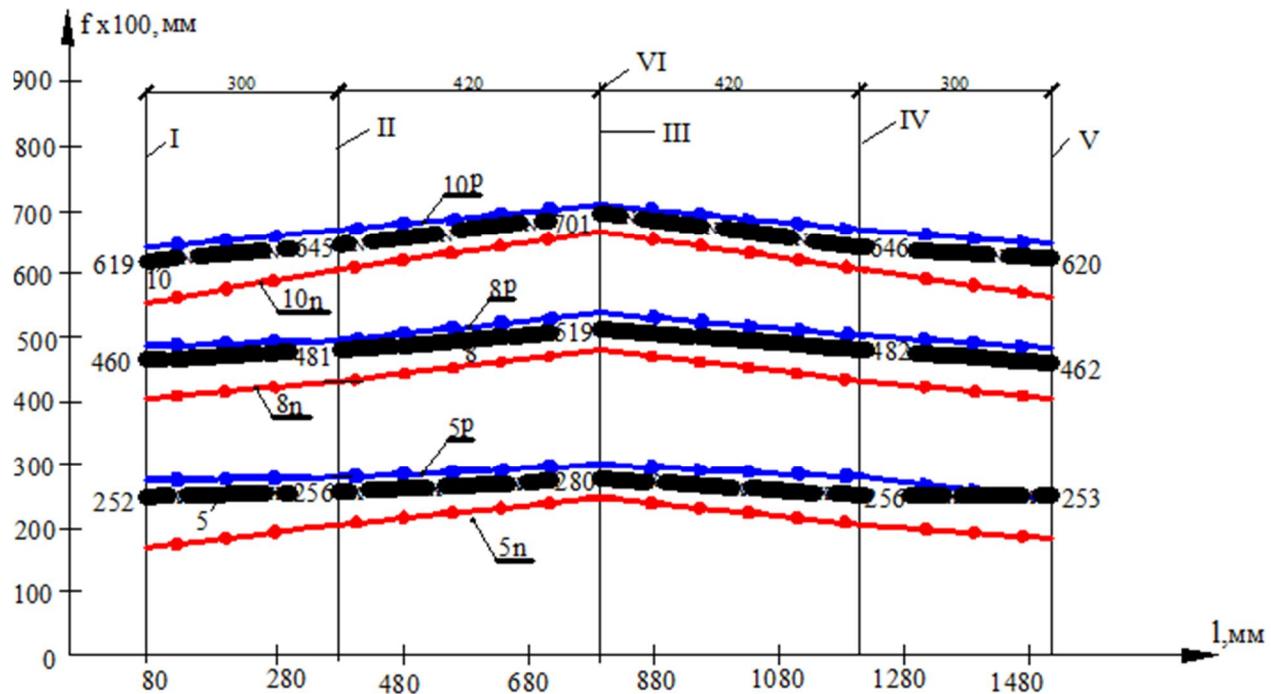
Определение напряженно-деформированного состояния осуществляется для  $n$  сечений  $n \geq 4$ , на которые разбивается для расчета рассматриваемый участок с наклонными трещинами. После этого внутренние усилия в образовавшихся железобетонных арках заменяются дополнительными внешними усилиями относительно изогнутой оси, т.е. в процессе итерации уточняется расчетная схема на рассматриваемом участке.

3. С использованием единичных полосок в расчетной схеме составного железобетонного стержня с трещинами выполняется расчет, и определяются кривизны (жесткости) выбранных  $n$  сечений железобетонной конструкции на участках наклонных трещин в соответствии с разработанной методикой.

Отличительными особенностями алгоритма предложенной расчетной методики являются: 1) последовательная реализация расчета по модулям «сечение», «стержневой элемент», «система» представляет возможным учитывать несовместность деформаций бетона и арматуры и нарушение сплошности бетона; 2) использование многоуровневой расчетной схемы обеспечивает получение достаточно строгого решения; 3) выбор определенного порядка решения задач трещиностойкости и жесткости позволяет при учете податливости продольных и поперечных связей в составном стержне исключить дифференциальные уравнения высоких порядков.

Для удобства вычислений (несмотря на то, что предлагаемая методика ориентирована на нормативные документы и обладает инженерной обозримостью выполняемых этапов рас-

чета), максимально использовался прикладной пакет математических программ MS Excel. Результаты сопоставительного анализа прогибов, определенных по нормативной методике [4], показали, что если в середине опытной конструкции они различаются лишь в пределах 11%, то в зоне наличия наклонных трещин такое различие может достигать 40% и более (рис. 7).



**Рисунок 7 – График прогибов опытной конструкции пятой серии БС-V-2-100-Ø6:**  
5, 8, 10 – экспериментальные кривые при нагрузке (кН) 85; 110,5; 119, соответственно;  
5n, 8n, 10n – расчетные кривые по нормативной методике; 5p, 8p, 10p – то же по  
предлагаемой методике; I, II, III, IV, V – оси установки прогибомеров П1, П2, П3, П4, П5  
соответственно; VI – оси, проходящие через середину пролета опытного образца

Результаты сопоставительного анализа прогибов представительной статистической выборки из 150 опытов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сопоставление данных расчетных методик

Расчётная методика	Количество опытов	Результаты статистической обработки данных		
		$\bar{X}$	$\sigma$	$C_V$
Предлагаемая методика	150	1,0808	0,085	7,94%
Методика норм	150	0,878	0,2528	28,8%

Как видно из таблицы 1 предлагаемая методика расчёта имеет заметные преимущества по сравнению с нормативной, о чём свидетельствует коэффициент вариации  $C_V = 7,94\%$  и значение среднего  $\bar{X}$  близкого к единице.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баширов, Х.З. Методика экспериментальных исследований прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям [Текст] / Х.З. Баширов, И.С. Горностаев, А.А. Дородных, К.М. Чернов // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №5. – С. 18-21.
2. Баширов, Х.З. Основные результаты экспериментальных исследований жесткости железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям [Текст] / Х.З. Баширов, И.С. Горностаев, С.И. Горностаев // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2013. – №3. – С. 14-17.

3. Баширов, Х.З. Ширина раскрытия наклонных трещин третьего типа в составных железобетонных конструкциях [Текст] / Х.З. Баширов, А.А. Дородных, В.И. Колчунов // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2012. – №6. – С. 3-7.

4. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения: СП 63.13330.2012. – [Введены в действие с 2013-01-01]. – М.: Министерство регионального развития РФ, 2012. – 156 с. – (Свод правил. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003).

5. Горностаев, И.С. Деформативность железобетонных составных конструкций с наклонными трещинами [Текст] / И.С. Горностаев, Н.В. Клюева, Вл.И. Колчунов, И.А. Яковенко // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – №5.

### Горностаев Иван Сергеевич

Юго-Западный государственный университет, г. Курск  
Аспирант кафедры «Промышленное и гражданское строительство»  
Тел.: +7 (4712) 50-48-16  
E-mail: pgs\_swsu@mail.ru

I. GORNOSTAEV

## ANALYSIS AND RESULTS OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF DEFORMATION OF COMPOSITE CONCRETE BEAMS

*The paper presents analyzes and some results of experimental and numerical studies of deformability for reinforced concrete composite structures. There was obtained the new experimental data on rigidity along the whole length of the structures and in the span; on the width of normal and inclined cracks at the level of longitudinal and transverse tensile reinforcement and all along the profile of a crack and moreover the data on changing the distance between the cracks and data on crack length under increasing load with effect of discontinuities for other parameters in the inclined cracks area.*

**Keywords:** reinforced concrete composite structures, experimental studies, deformability, inclined cracks.

## BIBLIOGRAPHY

1. Bashirov, H.Z. Metodika eksperimental'nyh issledovanij prochnosti, zhestkosti i treshhinostojkosti zhelezobetonnyh sostavnnyh konstrukcij po naklonnym sechenijam [Tekst] / H.Z. Bashirov, I.S. Gornostaev, A.A. Dorodnyh, K.M. Chernov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2013. – №5. – S. 18-21.

2. Bashirov, H.Z. Osnovnye rezul'taty eksperimental'nyh issledovanij zhestkosti zhelezobetonnyh sostavnnyh konstrukcij po naklonnym sechenijam [Tekst] / H.Z. Bashirov, I.S. Gornostaev, S.I. Gornostaev // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2013. – №3. – S. 14-17.

3. Bashirov, H.Z. Shirina raskrytiya naklonnyh treshhin tret'ego tipa v sostavnnyh zhelezobetonnyh konstrukcijah [Tekst] / H.Z. Bashirov, A.A. Dorodnyh, V.I. Kolchunov // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2012. – №6. – S. 3-7.

4. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozhenija: SP 63.13330.2012. – [Vvedeny v dejstvie s 2013-01-01]. – M.: Ministerstvo regional'nogo razvitiya RF, 2012. – 156 s. – (Svod pravil. Aktualizirovannaja redakcija SNiP 52-01-2003).

5. Gornostaev, I.S. Deformativnost' zhelezobetonnyh sostavnnyh konstrukcij s naklonnymi treshhinami [Tekst] / I.S. Gornostaev, N.V. Kljueva, Vl.I. Kolchunov, I.A. Jakovenko // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – 2014. – №5.

### I. Gornostaev

Southwest state university, Kursk  
Postgraduate student of the department «Industrial and civil construction»  
Ph.: +7 (4712) 50-48-16  
E-mail: pgs\_swsu@mail.ru

ЗАВЬЯЛОВА О.Б., ШЕИН А.И.

## РАСЧЁТ БЫСТРОВОЗВОДИМЫХ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСОВ С УЧЁТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ, ТВЕРДЕНИЯ И ПОЛЗУЧЕСТИ БЕТОНА

*Предложен алгоритм расчёта железобетонных рамных каркасов монолитных зданий с учётом ползучести бетона и изменения его модуля мгновенной упругости по [1]. Алгоритм базируется на методе сеточной аппроксимации элементов [2] с введённым фактором времени, что позволяет кроме физической нелинейности работы бетона одновременно учитывать ползучесть и последовательность возведения монолитного каркаса. Сделаны выводы по примерам реализации алгоритма в программе «МСАЭ – возведение и ползучесть».*

**Ключевые слова:** история нагружения, ползучесть бетона, физическая нелинейность.

При определении внутренних усилий в поперечных рамках гражданских и промышленных зданий проектировщик работает с расчётной схемой рамы, имеющей проектную этажность, причём нагружение ригелей такой рамы постоянными и временными нагрузками производится одновременно на всех этажах. Для оценки реального ресурса конструктивной безопасности зданий и сооружений с учётом фактического распределения внутренних усилий и связанных с ними деформаций в процессе их возведения необходим учёт истории нагружения с формированием растущей расчётной схемы и изменения физических характеристик материалов конструкции во времени. Следует отметить, что в последнее время монолитные каркасные здания возводятся ускоренными темпами (3-5 дней на этаж), в связи с чем возникает резонный вопрос: в какой мере оправдано нагружение бетона в таком весьма раннем возрасте? В настоящей работе учитывались последовательность возведения здания и одновременно процессы твердения и ползучести бетона, являющиеся функциями времени, а также физическая нелинейность работы бетона.

Расчёт производился по деформированной схеме методом сеточной аппроксимации элементов (МСАЭ). Метод позволяет вводить в уравнения любые интегральные и дифференциальные зависимости для описания свойств материалов, а также учитывать геометрическую нелинейность при деформировании элементов конструкции. Система нелинейных уравнений включает в себя: уравнения граничных условий (опоры); уравнения равновесия узлов; уравнения совместности деформаций в узлах; уравнения равновесия внешних и внутренних сил в заданных поперечных сечениях, учитывающие продольные и поперечные деформации элементов и представляющие собой дифференциальные уравнения первого и второго порядков. Для приведения системы дифференциальных уравнений к алгебраическому виду использована конечно-разностная аппроксимация. Система нелинейных уравнений решалась методом касательных Ньютона с использованием невырожденной матрицы Якоби и организацией пошаговых итераций. В качестве критерия сходимости расчёта принята заданная норма расхождения перемещений в последовательных итерациях.

Изменение модуля упругости бетона в процессе твердения принято по экспоненциальной зависимости [1]:

$$E_b(t) = E_0 \cdot (1 - e^{-\alpha t}). \quad (1)$$

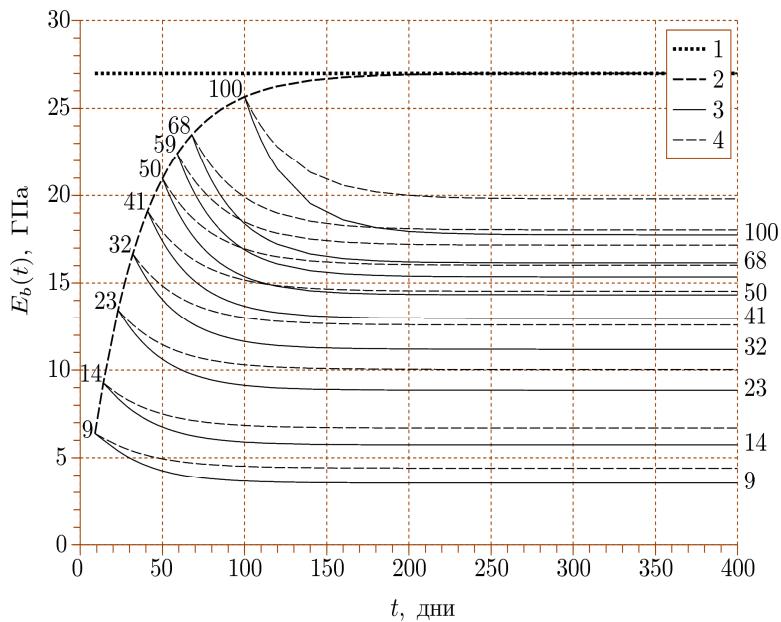
Учёт ползучести бетона осуществляется при помощи коэффициентов  $B_z(t_1, t)$ , полученных на основе зависимостей для сжатия и для изгиба [1] путём умножения модуля упругости бетона в соответствующем возрасте  $E_b(t)$  на коэффициент  $B_z(t_1; t)$ :

$$B_z(t_1, t) = 1 - \frac{\gamma \mu E_s n_0 \varphi(t_1)}{1 + \mu n_0 m(t_1)} \int_{t_1}^t e^{-\int_{\tau}^t \left( \gamma + \frac{\gamma \mu E_s n_0 \varphi(u)}{1 + n_0 \mu m(u)} + \frac{\mu n_0 m'(u)}{1 + \mu m(u)} \right) du} d\tau. \quad (2)$$

В приведённых выражениях:

$t_1$  – возраст бетона в момент нагружения;  $t$  – возраст к моменту наблюдения;  $\mu$  – коэффициент армирования поперечного сечения;  $\varphi(t) = C_0 + A_1/t$  – функция для учёта меры ползучести;  $C_0$  – предельное значение меры ползучести для материала;  $A_1, \gamma, \alpha$  – постоянные параметры меры ползучести;  $m(t) = E_s/E_b(t)$  – отношение модулей упругости арматуры и бетона (в возрасте бетона  $t$ -дней);  $n_0$  – коэффициент, учитываемый при изгибе.

Графики модуля упругости бетона в зависимости от возраста бетона к моменту нагружения (указан цифрами от 9 до 100 суток) и с учётом коэффициентов ползучести приведены на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Модуль упругости бетона  $E_b$ :** 1 – начальный модуль; 2 – с учётом твердения:  $E_b(t) = E_0 \cdot (1 - e^{-\alpha t})$ ; 3 – при изгибе с учётом ползучести:  $E_{b1}(t_1; t) = E_{b0}(t_1) \cdot B_1(t_1; t)$ ; 4 – при растяжении-сжатии с учётом ползучести:  $E_{b2}(t_1; t) = E_{b0}(t_1) \cdot B_2(t_1; t)$

Для аппроксимации диаграммы работы бетона  $\sigma - \varepsilon$  принято выражение вида [3]:

$$\sigma_b = E_b \varepsilon - A_3 \varepsilon^3, \quad (3)$$

модернизированное для учёта фактора времени к виду:

$$\sigma_b(t_1; t) = E_b(t_1; t) \varepsilon - A_3(t) \varepsilon^3. \quad (4)$$

Здесь

$$A_3 = \frac{4}{27} \frac{E_b^3(t_1; t)}{R_b^2(t)} \quad (5)$$

$R_b(t)$  – временное сопротивление бетона текущего возраста, определяемое по известной логарифмической зависимости:

$$R_b(t) = 0,7 R_b \lg t. \quad (6)$$

Жёсткость поперечного сечения при изгибе с учётом деформаций, возникающих в арматуре от изгибающего момента и продольной силы, вычисляется по выражению:

$$EI(t_1; t) = E_{b1}(t_1; t) \cdot I_b - A_3(t_1) \cdot (v'')^2 \frac{bh^5}{80} + E_s I_s + \sum E_s A_{sj} y_{sj} \frac{u'}{v''}. \quad (7)$$

Жёсткость при растяжении – сжатии с учётом деформаций, возникающих в арматуре от продольной силы и изгибающего момента, определяется по формуле:

$$EA(t_1; t) = E_{b2}(t_1; t) \cdot A_b - A_b A_3(t_1) \cdot (u')^2 + E_s A_s + \sum E_s A_{sj} y_{sj} \frac{v''}{u'}. \quad (8)$$

Алгоритм расчёта с использованием программы «МСАЭ – возвведение и ползучесть» был реализован в численных примерах по расчёту многоэтажных монолитных железобетонных рам. Предварительно был выполнен тестовый расчёт рамы без учёта последовательности нагружения по МКЭ (программа SCAD) и по МСАЭ. Результаты расчёта практически совпали, что свидетельствует о правильности расчёта по предлагаемой программе.

Для иллюстрации расчёта принята 6-этажная рама со следующими характеристиками: пролёт рамы – 6 м, число пролётов – 1, высота этажа – 6 м, колонны сечением  $60 \times 40$  см, армирование симметричное:  $A_s=42,39$  см $^2$ ,  $h_s=17$  см; ригели  $30 \times 60$  см, армирование симметричное,  $A_s=42,39$  см $^2$ ,  $h_s=27$  см. Бетон класса В20, нормативный модуль упругости бетона  $E_0=27$  ГПа, модуль упругости арматуры  $E_s=200$  ГПа. Этапы проведения монолитных работ приняты следующие: 9 суток на один этаж.

Результаты расчета показали, что учёт твердения и ползучести бетона не даёт видимого увеличения в величине изгибающих моментов, но приводит к существенным перераспределениям напряжений между бетоном и арматурой. Кроме того, происходит значительный рост перемещений (рис. 2):

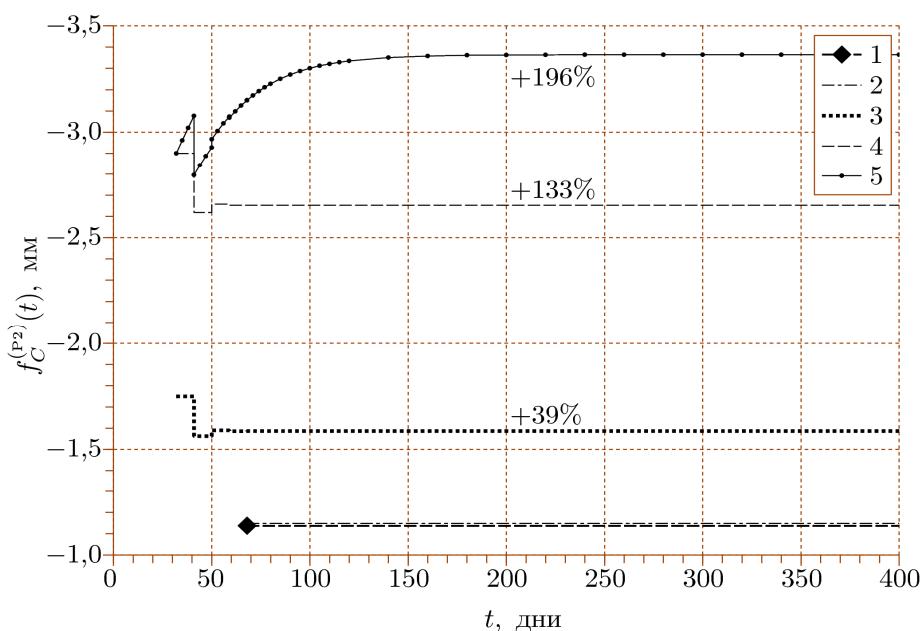


Рисунок 2 – Стрела прогиба ригеля второго этажа (от нагрузок на этапе возведения):

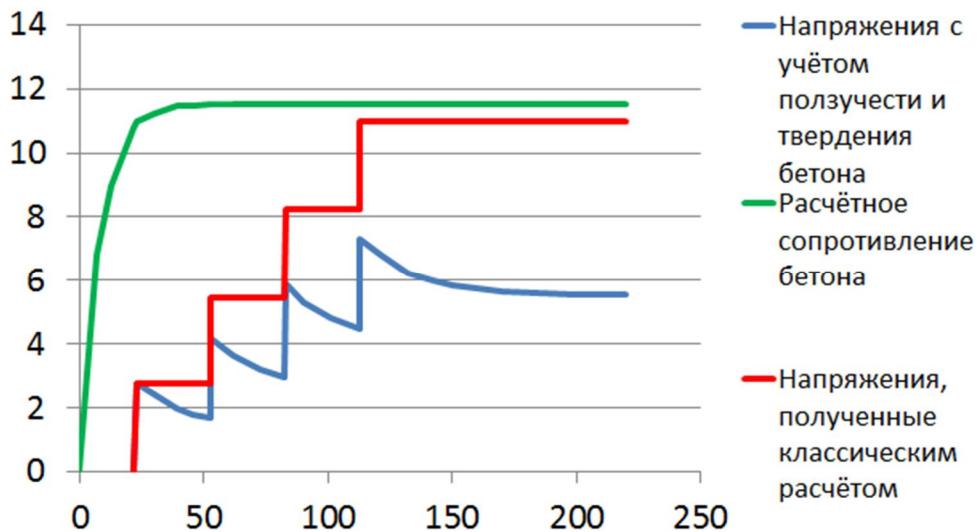
- 1 – по МКЭ;
- 2 – по МСАЭ;
- 3 – с учётом последовательности возведения;
- 4 – с учётом твердения бетона;
- 5 – с учётом ползучести бетона

На рисунке 2 графики 1 и 2, которые практически совпадают, получены при нагружении 6-тиэтажной рамы одновременно на всех этажах равномерно распределённой нагрузкой  $q_1=30$  кН/м. Графики 3-5 учитывают последовательность нагружения. Этим объясняются скачки прогиба в первые дни. Например, ригель второго этажа включился в работу на 32 день, когда с него была снята опалубка, его прогиб получил определённое значение, на 41 день включился в работу ригель третьего этажа, при этом рассматриваемый ригель получил небольшой выгиб вверх, т.е. его прогиб уменьшился; очередной ригель вновь несколько догрузил рассматриваемый.

Оценим изменение напряжённо-деформированного состояния колонны и ригеля первого этажа с учётом истории нагружения.

Нагружение ригеля первого этажа было принято следующими этапами (с интервалами в один месяц):

- в возрасте 23 дн. (снятие временных опор) нагрузка  $q_1=30 \text{ кН/м}$  – собственный вес перекрытия первого этажа;
- в возрасте 53 дн. добавлено  $q_2=30 \text{ кН/м}$ ;
- в возрасте 83 дн. приложено  $q_3=30 \text{ кН/м}$ ;
- в возрасте 113 дн. добавлено  $q_4=30 \text{ кН/м}$ .



*Рисунок 3 – Диаграмма напряжений в бетоне сжатой зоны среднего сечения ригеля 1-го этажа при поэтапном нагружении (МПа)*

На каждом этапе были вычислены упруго-мгновенные напряжения в бетоне сжатой зоны с учётом действительного значения модуля упругости бетона. Затем использованы зависимости Н.Х. Арутюняна для учёта твердения и ползучести бетона. На рисунке 3 показано изменение напряжений в бетоне сжатой зоны в среднем сечении ригеля первого этажа.

Из рисунка 3 видно, что напряжения, полученные классическим расчётом, на четвёртом этапе нагружения приближаются к расчётному сопротивлению бетона при сжатии. Расчёт с учётом твердения и ползучести бетона показывает, что действительные напряжения в бетоне сжатой зоны на всех этапах нагружения намного ниже. Быстро наступающая ползучесть и связанная с ней релаксация напряжений в бетоне проявляется примерно в течение 30 суток от момента приложения нагрузок очередного этапа. Постепенное приложение нагрузки малыми порциями, как это обычно и происходит в процессе строительства, позволит избежать «пиков» на эпюре  $\sigma(t)$ . В рассмотренной раме установившиеся по истечении 200 суток нормальные напряжения в бетоне ригеля первого этажа, составляют 50% от его расчётного сопротивления. Очевидно, что ускорение сроков строительства монолитных железобетонных каркасов при учёте действительной работы бетона не вызывает опасений со стороны напряжений в бетоне, но при этом следует иметь в виду значительный рост не учтённых напряжений в арматуре элементов каркаса (рис. 4, 5).

В рассматриваемом примере превышение действительных напряжений в арматуре ригеля составило 1,7 раза, в арматуре колонны – 2,6 раза. При этом следует отметить, что дополнительный прирост упруго-мгновенных напряжений в арматуре составил порядка 20% по сравнению с вычисленными классическим расчётом, т.е. при нормативной величине  $E_b$ . Выявить реальное распределение напряжений в материале конструкций в соответствии с календарным планом производства работ и, возможно, скорректировать этот план поможет предлагаемая методика расчёта, реализованная в методе сеточной аппроксимации элементов.

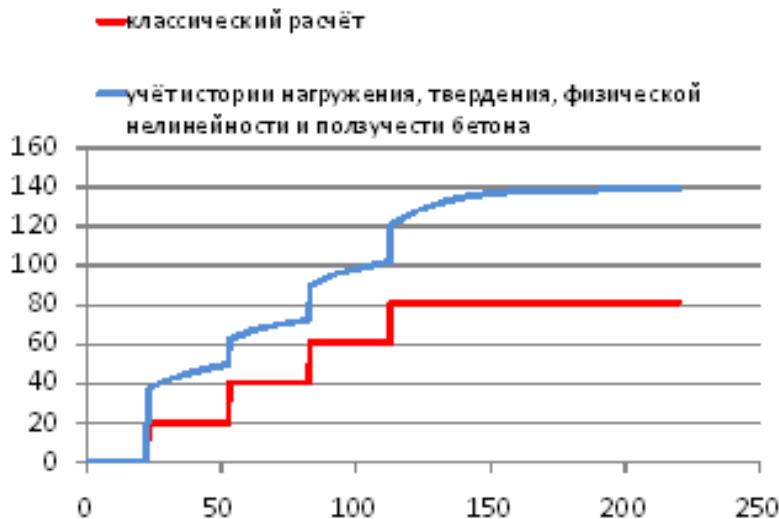


Рисунок 4 – Напряжения (МПа) в арматуре среднего сечения ригеля 1-го этажа при поэтапном нагружении с учётом действительной работы бетона

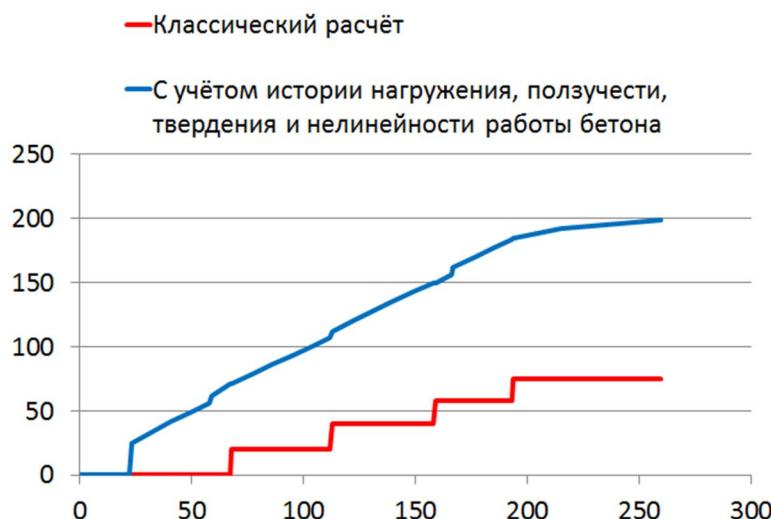


Рисунок 5 – Напряжения (МПа) в сжатой арматуре колонны 1-го этажа (верхнее сечение) при поэтапном нагружении с учётом действительной работы бетона

Выводы по результатам расчёта:

- Нагружение бетона в ранние сроки приводит к значительному уменьшению конструктивной безопасности монолитных зданий.
- Увеличение стрелы прогиба в ригелях монолитной рамы при учёте твердения и ползучести бетона достигает 130-190% по сравнению с классическим расчётом.
- Учёт последовательности возведения монолитной рамы даёт до 40% расхождения внутренних усилий от нагрузок, учитываемых на этапе возведения, в наиболее нагруженных элементах по сравнению с определяемыми классическим расчётом.
- Превышение действительных напряжений в арматуре ригеля составило 1,7 раза, в арматуре колонны – 2,6 раза. При этом следует отметить, что только за счёт использования формулы (1) для учёта реального модуля упругости бетона в момент нагружения, дополнительный прирост упруго-мгновенных напряжений в арматуре составил порядка 20% по сравнению с вычисленными классическим расчётом.
- Выявить реальное распределение напряжений в материале конструкций в соответствии с календарным планом производства работ и, возможно, скорректировать этот план, поможет предлагаемая методика расчёта, реализованная в методе сеточной аппроксимации элементов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Арутюнян, Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести [Текст] / Н.Х. Арутюнян. – М.: Гостехиздат. – 1952. – 323 с.
2. Шеин, А.И. Метод сеточной аппроксимации элементов в задачах строительной механики нелинейных стержневых систем [Текст] / А.И. Шеин. – Пенза: ПГУАС. – 2005. – 248 с.
3. Лукаш, П.А. Основы нелинейной строительной механики [Текст] / П.А. Лукаш. – М.: Стройиздат, – 1978. – 208 с.
4. Завьялова, О.Б. Учёт последовательности монтажа конструкций при расчёте усилий в рамных системах [Текст] / О.Б. Завьялова // Известия вузов. Строительство. – 2009. – №2. – С. 115-122.
5. Завьялова, О.Б. Учёт истории нагружения монолитных железобетонных плитно-стержневых систем при определении напряженного состояния их элементов [Текст] / О.Б. Завьялова // ПГС. – 2012. – №7. – С. 58-61.
6. Завьялова, О.Б. Учёт истории возведения и нагружения сборных рамных каркасов [Текст] / О.Б. Завьялова // ПГС. – 2014. – №4. – С. 38-40.

**Завьялова Ольга Борисовна**

Астраханский инженерно-строительный институт, г. Астрахань  
Кандидат технических наук, доцент, декан строительного факультета  
E-mail: zavyalova\_ob@aucu.ru

**Шеин Александр Иванович**

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика»

---

O. ZAV'YALOVA, A. SHEIN

**THE RAPIDLY ERECTED MONOLITHIC CONCRETE FRAME  
CALCULATION TAKING INTO ACCOUNT THE PHYSICAL  
NONLINEARITY, CONCRETE HARDENING AND CREEP**

*The computation algorithm of monolithic concrete-frame building taking into account concrete creep and its modulus of instantaneous elasticity change according to [1] is offered. The algorithm is based on network approximation element method [2] taking into account time effect. It makes possible to take into account as physical nonlinearity of concrete behavior so concrete creep and erection sequence of monolithic concrete frame. The conclusions about realization of algorithm in the program «Network approximation elements method – erection and creep» are made.*

**Keywords:** loading history, concrete creep, physical nonlinearity.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Arutjunjan, N.H. Nekotorye voprosy teorii polzuchesti [Tekst] / N.H. Arutjunjan. – M.: Gostehizdat. – 1952. – 323 s.
2. Shein, A.I. Metod setochnoj approksimacii jelementov v zadachah stroitel'noj mehaniki nelinejnyh sterzhnevih sistem [Tekst] / A.I. Shein. – Penza: PGUAS. – 2005. – 248 s.
3. Lukash, P.A. Osnovy nelinejnoj stroitel'noj mehaniki [Tekst] / P.A. Lukash. – M.: Strojizdat, – 1978. – 208 s.
4. Zav'jalova, O.B. Uchjot posledovatel'nosti montazha konstrukcij pri raschjote usilij v ramnyh sistemah [Tekst] / O.B. Zav'jalova // Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. – 2009. – №2. – S. 115-122.
5. Zav'jalova, O.B. Uchjot istorii nagruzhenija monolitnyh zhelezobetonnyh plitno-sterzhnevih sistem pri opredelenii naprjazhennogo sostojanija ih jelementov [Tekst] / O.B. Zav'jalova // PGS. – 2012. – №7. – S. 58-61.
6. Zav'jalova, O.B. Uchjot istorii vozvedenija i nagruzhenija sbornyh ramnyh karkasov [Tekst] / O.B. Zav'jalova // PGS. – 2014. – №4. – S. 38-40.

**O. Zav'yalova**

Astrakhan institute of civil engineering, Astrakhan  
Candidate of technical sciences, professor, dean of engineering faculty  
E-mail: zavyalova\_ob@aucu.ru

**A. Shein**

Penza state university of architecture and construction, Penza  
Doctor of technical sciences, professor, head of the department «Mechanics»

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ В ГРАНУЛИРОВАННЫХ СУХИХ И ВОДОНАСЫЩЕННЫХ СРЕДАХ

*Предложена модель гранулированной среды, представляющей собой гексагональную упаковку частиц-шаров одинакового размера. Получены формулы скоростей распространения волн напряжений в сухих и водонасыщенных средах. Полученные результаты предполагается использовать для оценки воздействия сейсмических волн на тоннели из погруженных секций, расположенных на дне рек и проливов. При определении деформации скелета (сфер) используется контактная теория Герца.*

**Ключевые слова:** гранулированная среда, теория Герца, водонасыщенная среда.

Многие сооружения и, в частности, тоннели из погруженных секций расположены в водонасыщенных грунтах. При расчёте на динамические воздействия таких сооружений необходимо знать скорости распространения волн в композитных средах. Скорости распространения волн зависят от характеристик жидкой среды и расположенных в ней твердых частиц. Этими частицами могут быть песчинки различных размеров, жидкость-вода.



*Рисунок 1 – Схема расположения подводного тоннеля*

Характеристики распространения волн зависят от индивидуальных свойств материалов, составляющих эти среды: жёсткого скелета и жидкости.

Для определения скоростей распространения волн в таких средах будут использоваться следующие параметры:

$\rho_{ж}$ ,  $k_{ж}$  – плотность и объёмный модуль жидкости;

$\rho_c$ ,  $k_c$ ,  $E_c$ ,  $\mu_c$ ,  $v_c$  – плотность и упругие константы материала скелета;

$\tilde{\rho}_c$ ,  $\tilde{k}_c$ ,  $\tilde{E}_c$ ,  $\tilde{\mu}_c$ ,  $\tilde{v}_c$  – плотность и упругие константы сухого скелета;

$\varphi = 1 - \frac{\tilde{\rho}}{\rho_c}$  – коэффициент пористости.

Вопросами распространения волн в отложениях на дне морей и океанов занимались многие исследователи [1, 2, 3, 4, 5]. Наиболее часто используемой формулой, описывающей распространение волн в водонасыщенных средах, является формула Вуда [6].

При выводе этой формулы предполагается, что твердые частицы и жидкость движутся вместе, поэтому плотность среды определяется выражением:

$\rho = \eta_{ж}\rho_{ж} + \eta_c\rho_c$ , где  $\eta_{ж}$  и  $\eta_c$  – параметры, определяющие фракционный состав среды.

При приложении давления к элементарному объёму общее изменение объёма определяется изменением объёма каждой фракции:

$\frac{\Delta V_{\text{ж}}}{V_{\text{ж}}} = \frac{p}{k_{\text{ж}}} u$  и  $\frac{\Delta V_c}{V_c} = \frac{p}{k_c}$ . Просуммировав изменения объёма каждой фракции и разделив на полный объём, получим:  $-\frac{\Delta V}{V} = \frac{pV_{\text{ж}}}{k_{\text{ж}}V} + \frac{pV_c}{k_cV} \Rightarrow -\frac{\Delta V}{V} = \frac{p\eta_{\text{ж}}}{k_{\text{ж}}} + \frac{p\eta_c}{k_c} \Rightarrow \frac{1}{k} = \frac{\eta_{\text{ж}}}{k_{\text{ж}}} + \frac{\eta_c}{k_c}$

или

$$\frac{1}{k} = \frac{\eta_{\text{ж}}}{k_{\text{ж}}} + \frac{\eta_c}{k_c} \Rightarrow k = \frac{k_{\text{ж}}k_c}{\eta_{\text{ж}}k_c + k_{\text{ж}}\eta_c}.$$

Тогда скорость волн сжатия в двухкомпонентной среде определится выражением, называемым формулой Вуда:  $\alpha = \sqrt{\frac{k}{\rho}} = \sqrt{\frac{k_{\text{ж}}k_c}{(\eta_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}} + \eta_c\rho_c)(\eta_{\text{ж}}k_c + \eta_c k_{\text{ж}})}}$ .

Было выполнено большое количество опытов для сравнения скоростей распространения волн, полученных экспериментальным путём, с формулой Вуда. Формула Вуда хорошо описывает скорости распространения волн сжатия в композитных средах, состоящих иззвешенных частиц, находящихся в жидкых средах. Эта формула применима для дисперсных водонасыщенных грунтов, являющихся отложениями на дне рек и океанов. Однако было отмечено, что в водонасыщенных грунтах с жёстким скелетом результаты, полученные с использованием формулы Вуда, не согласуются с экспериментальными данными.

#### Особенности распространения волн напряжений в гранулированных средах

На первом этапе исследований распространения волн напряжений в водонасыщенных грунтах представляют интерес вопросы распространения волн в сухих несвязанных грунтах. Одной из хорошо исследованных моделей является среда, состоящая из прижатых друг к другу упругих сфер (например, песчинок), в которой появляются дополнительные напряжения. Такие исследования необходимы для разработки более сложной модели, в которой полости между частицами заполнены жидкостью. Результаты полевых испытаний показали, что теоретические модели гранулированных сред, состоящие изупакованных сфер, хорошо описывают распространение сейсмических волн в рыхлых неконсолидированных средах.

В последнее время усилия многих исследователей направлены на создание моделей гранулированных сред, состоящих из частиц различных форм и размеров, упакованных случайным образом. На кафедре «Подземные сооружения» МИИТа исследовались динамические свойства искусственной среды, состоящей из смеси гранул полимерного материала (полиэтилена) и песка [7]. Размеры гранул полимерного материала значительно больше диаметров песчинок. Целью исследований является разработка сыпучей среды, обладающей определёнными свойствами, для использования её в качестве сейсмоизолирующих ивиброизолирующих слоёв.

Рассмотрим распространение продольных и поперечных волн в гранулированных средах (в природе это – песок). Возможны различные виды упаковок сфер. В настоящей работе рассматривается более плотная гексагональная упаковка. Схема расположения сфер представлена на рисунке 2.

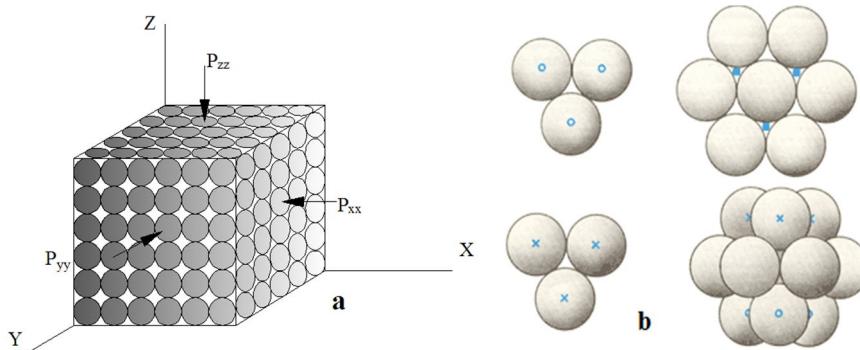


Рисунок 2 – Элементарные объемы гранулированных сред (а); пространственная схема касания сфер (б)

Будем полагать, что в начальном состоянии на каждую грань элементарного объема действует нормальное напряжение, среднюю величину которого обозначим  $\tilde{p}$ , которое деформируют сферы в точках соприкосновения. Деформации упругих сфер при действии этих дополнительных напряжений можно определить, используя теорию контактных напряжений Герца.

Выберем систему координат таким образом, чтобы ряды упругих сфер были расположены параллельно координатным осям. Обозначим буквой  $r_c$  радиус сферы, тогда сила, действующая на каждый ряд сфер, будет равна  $P = 4r_c^2 \tilde{p}$ . В таком случае относительные вертикальные смещения двух сфер, находящихся в двух смежных слоях, можно определить с использованием схемы, представленной на рисунке 3.

Предположим, что вдоль вертикальной оси приложены равные нормальные напряжения с величиной  $\tilde{p}_{zz}$ . Тогда силы, действующие на каждый ряд сфер, определяются выражением:  $P = 4r_c^2 \tilde{p}_{zz}$ .

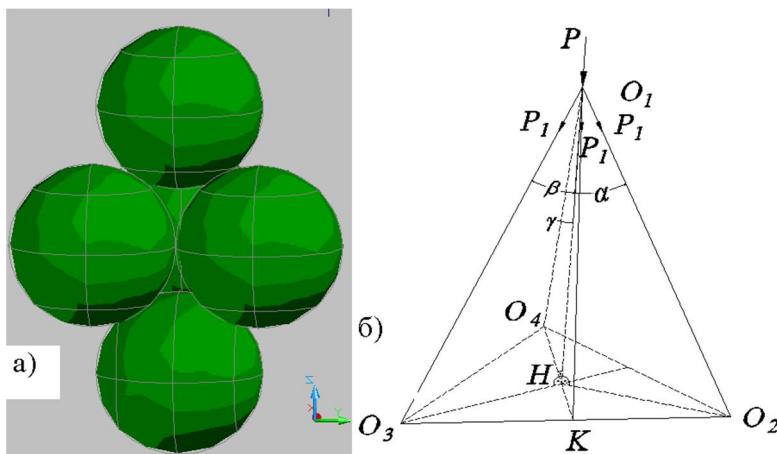


Рисунок 3 – Расчетная схема для определения относительных вертикальных смещений

На рисунке 3, б  $O_1, O_2, O_3, O_4$  центры шаров и расстояние между ними равно  $2r$  и  $O_4H = O_2H = O_3H = \frac{2}{3}O_4K = \frac{2}{3}\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)2r = \frac{2r}{\sqrt{3}}$ .

Разложим вертикальную силу  $P$  на три равные составляющие  $P_1$ , проходящие через центры шаров. Тогда силы, приложенные к шарам, определяются по формуле:

$$3P_1 \cos(\alpha) = P; \rightarrow P_1 = \frac{P}{3 \cos \alpha} = \frac{P}{\sqrt{6}} \\ \cos \alpha = \frac{O_1H}{O_1O_2} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}; \sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}; O_1H = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}}r \quad (1)$$

Под действием двух равных по величине сил  $P_1$  центры двух сфер  $O_1, O_2$  сближаются на расстояние  $\delta_1$  [8]:

$$\delta_1 = \left[ \frac{9(1-v_c^2)^2 P_1^2}{2E_c^2 r_c} \right]^{1/3} = \left[ \frac{3(1-v_c^2)^2 P^2}{4E_c^2 r_c} \right]^{1/3}. \quad (2)$$

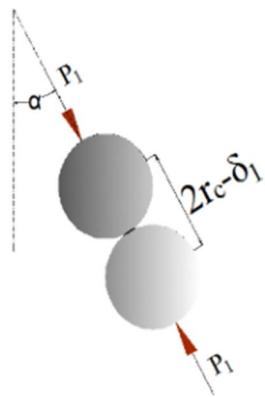


Рисунок 4 – Зона контакта двух сфер

В таком случае две сферы, расположенные на верхней и нижней плоскостях, сближаются по вертикали на расстояние  $\delta$ . Это расстояние можно определить по формуле:

$$\delta = 2\delta_1 \cos \alpha = \left[ \frac{3(1-v_c^2)^2 P^2}{4E_c^2 r_c} \right]^{1/3} \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \left[ \frac{8(1-v_c^2)^2 P^2}{\sqrt{6} E_c^2 r_c} \right]^{1/3}. \quad (3)$$

Пусть вдоль оси  $z$  распространяется плоская продольная волна. Дополнительное смещение между центрами двух сфер  $\Delta\delta$ , возникающее в результате приложения добавочной силы,  $\Delta P = -4r_c^2 \tilde{p}_{zz}$ , а средняя деформация определится выражением:

$$\tilde{\varepsilon}_{zz} = -\frac{\Delta\delta}{2O_1 H} = -\frac{\sqrt{3}\Delta\delta}{4\sqrt{2}r_c}. \quad (4)$$

Вычислив приращение  $\Delta\delta$  согласно формуле (3), получим:

$$\frac{\tilde{p}_{zz}}{\tilde{\varepsilon}_{zz}} = \frac{\Delta P}{4r_c^2 \left( \frac{\sqrt{3}\Delta\delta}{4\sqrt{2}r_c} \right)} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\Delta P}{\Delta\delta r_c} = \left[ \frac{9E_c^2 \tilde{p}_{zz}}{4(1-v_c^2)^2} \right]^{1/3}. \quad (5)$$

С учетом приведенных определений средних напряжений и деформаций получим выражение для упругого модуля гранулированной среды:

$$\tilde{E}_c = \frac{\tilde{p}_{zz}}{\tilde{\varepsilon}_{zz}} = \left[ \frac{\sqrt{6}E_c^2 r_c P}{8(1-v_c^2)^2} \right]^{1/3} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}r_c} = \left[ \frac{9E_c^2 P}{16(1-v_c^2)^2 r_c^2} \right]^{1/3} = \left[ \frac{9E_c^2 \tilde{p}_{zz}}{4(1-v_c^2)^2} \right]^{1/3}. \quad (6)$$

Решение задачи о плотности упаковки одинаковых сфер было найдено К.А. Роджерсом (Бирмингемский университет). Он доказал, что никакая упаковка шаров не может иметь плотность, большую чем 0,7796. Сам Роджерс заметил: «многие математики верят, а все физики знают, что правильный результат составляет около 74% [9]. В настоящей работе принято, что плотность определяется по формуле  $\tilde{\rho}_c \approx 0.74 \rho_c$ .

Скорость распространения продольных волн в среде с упаковкой, представленной на рисунке 2, б, определяется по формуле:

$$\alpha_1 = \left[ \frac{9E_c^2 \tilde{p}_{zz}}{4(1-v_c^2)^2 r_c^2} \right]^{1/6} \left[ \frac{1}{0.74 \rho_c} \right]^{1/2} = 1.33 \left[ \frac{E_c^2 \tilde{p}_{zz}}{(1-v_c^2)^2 \rho_c^3} \right]^{1/6}. \quad (7)$$

Скорость распространения продольных волн в среде с упаковкой, представленной на рисунке 2, а, в соответствии с [10] определяется по формуле:

$$\alpha = \left[ \frac{3^4 E_c^2 p_{zz}}{\pi^3 (1-v_c^2)^2 \rho_c^3} \right]^{1/6} = 1.173 \left[ \frac{E_c^2 p_{zz}}{(1-v_c^2)^2 \rho_c^3} \right]^{1/6}. \quad (8)$$

Отношение между скоростями распространения продольных волн:

$$\frac{\alpha}{\alpha_1} = 0.88$$

При анализе распространения поперечных волн необходимо учитывать касательные силы в точках соприкосновения деформируемых сфер и перемещения сфер.

Также как при определении скоростей продольных волн будем полагать, что в начальном состоянии на каждую грань элементарного объёма действуют нормальные напряжения, а также касательные напряжения. Среднюю величину нормального напряжения обозначим  $\tilde{p}$ . При распространении поперечных волн в направлении оси  $z$  необходимо рассмотреть средние значения перемещений, параллельных оси  $x$ , и средние значения деформаций  $\tilde{\varepsilon}_{xz} = \frac{\Delta x}{\Delta z}$ .

Обозначим приращение касательной силы, действующей в зоне контакта двух шаров,  $\Delta G = 4r_c^2 \tilde{p}_{xz}$ . Для определения модуля сдвига необходимо определить отношение напряжений к средним деформациям сдвига.

На рисунке 3 показаны силы, действующие на три слоя. Определим относительное смещение между двумя шарами верхнего и нижнего слоя.

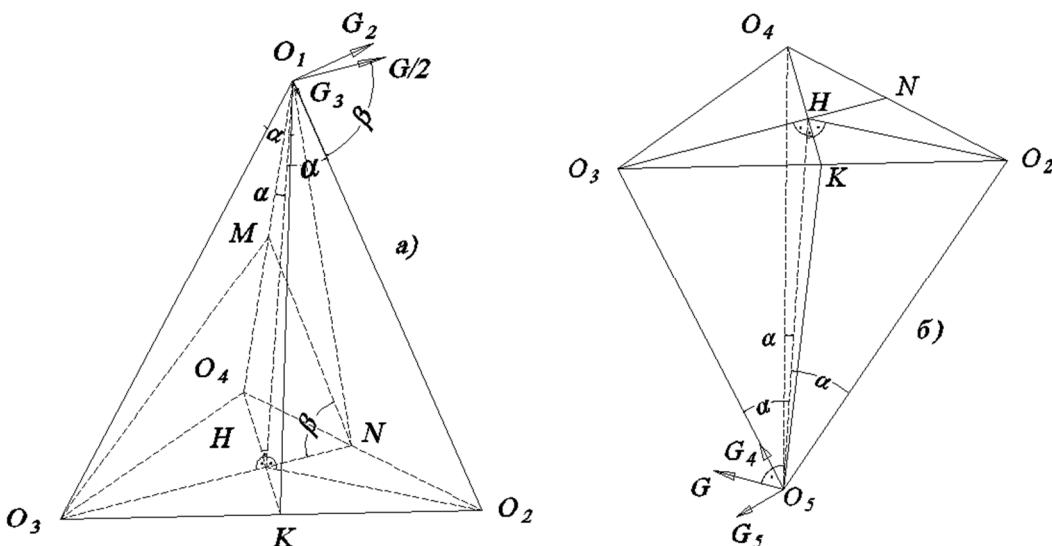


Рисунок 5 – Схема разложения сил: а – для верхнего и среднего слоев;  
б – для нижнего и среднего слоев

На рисунке 5 представлено разложение горизонтальной силы на две составляющие. Используя условие равновесия, получим следующие соотношения:

$$G_3 = \frac{G \cos \beta}{2} = \frac{G}{4\sqrt{3}};$$

$$G_2 = \frac{G \sin \beta}{2} = \frac{\sqrt{11}G}{4\sqrt{3}}, \quad (9)$$

где  $\beta$  – угол между векторами сил  $G$  и  $G_3$  и  $\cos \beta = \frac{MN^2 + O_3N^2 - O_3M^2}{2MN \cdot O_3N} = \frac{3r^2 + r^2 - 3r^2}{2\sqrt{3}r^2} = \frac{1}{2\sqrt{3}}$ .

Используя теорию Герца, получим выражение для перемещений в зависимости от вертикальной силы:

$$\delta_3 = \left[ \frac{9(1-v_c^2)^2 G_3^2}{2E_c^2 r_c} \right]^{1/3} = \left[ \frac{3(1-v_c^2)^2 G^2}{32E_c^2 r_c} \right]^{1/3}. \quad (10)$$

Смещение центров шара в направлении, перпендикулярном линии  $O_1O_2$ , определяется по формуле [11]:

$$s_2 = (1 + v_c)(2 - v_c) \left[ \frac{9G_2^2}{16(1 - v_c^2)E_c^2 r_c} \right]^{1/3} = (1 + v_c)(2 - v_c) \left[ \frac{33G^2}{256(1 - v_c^2)E_c^2 r_c} \right]^{1/3}. \quad (11)$$

Перемещение верхнего шара по горизонтали определяется по формуле:

$$x_1 = \delta_3 \cos \beta = \frac{1}{2\sqrt{3}} \left[ \frac{3(1 - v_c^2)^2 G^2}{32E_c^2 r_c} \right]^{1/3} = \left[ \frac{(1 - v_c^2)^2 G^2}{256\sqrt{3}E_c^2 r_c} \right]^{1/3}, \quad (12)$$

$$x_2 = s_2 \sin \beta = \frac{\sqrt{11}}{2\sqrt{3}} (1 + v_c)(2 - v_c) \left[ \frac{33G^2}{256(1 - v_c^2)E_c^2 r_c} \right]^{1/3}$$

Силу  $G$ , которая приложена к нижней сфере, разложим на две составляющие:

$$G_4 = G \sin \alpha = \frac{G}{\sqrt{3}}, \quad G_5 = G \cos \alpha = \sqrt{\frac{2}{3}}G. \quad (13)$$

Смещение центра шара по направлению, перпендикулярному линии  $O_1O_3$ , определяется по формуле:

$$\delta_4 = \left[ \frac{9(1 - v_c^2)^2 G_4^2}{2E_c^2 r_c} \right]^{1/3} = \left[ \frac{3(1 - v_c^2)^2 G^2}{2E_c^2 r_c} \right]^{1/3}, \quad (14)$$

$$s_5 = (1 + v_c)(2 - v_c) \left[ \frac{3G^2}{8(1 - v_c^2)E_c^2 r_c} \right]^{1/3}$$

Перемещение по горизонтали:

$$x_3 = \delta_4 \sin \alpha = \left[ \frac{(1 - v_c^2)^2 G^2}{2\sqrt{3}E_c^2 r_c} \right]^{1/3}, \quad (15)$$

$$x_4 = s_5 \cos \alpha = (1 + v_c)(2 - v_c) \left[ \frac{G^2}{2\sqrt{6}(1 - v_c^2)E_c^2 r_c} \right]^{1/3}$$

Из выражений (12) и (15) следует, что относительное суммарное горизонтальное перемещение между двумя сферами определяется по формуле:

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\partial x}{\partial z} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{O_1 H} =$$

$$= \left( \frac{\tilde{p}_{zx}^2}{E_c^2} \right)^{1/3} \left( \left( \frac{3(1 - v_c^2)^2}{256\sqrt{2}} \right)^{1/3} + (1 + v_c)(2 - v_c) \left( \frac{363\sqrt{11}}{2048\sqrt{2}(1 - v_c^2)} \right)^{1/3} \right) + \cdot \quad (16)$$

$$\left( \frac{\tilde{p}_{zx}^2}{E_c^2} \right)^{1/3} \left( \left( \frac{3(1 - v_c^2)^2}{2\sqrt{2}} \right)^{1/3} + (1 + v_c)(2 - v_c) \left( \frac{3}{4(1 - v_c^2)} \right)^{1/3} \right)$$

Выражение для определения модуля сдвига для гранулированных сред:

$$\tilde{\mu}_c = \frac{\tilde{p}_{zx}}{\varepsilon_{zx}} = \frac{\left[ \tilde{p}_{zx} E_c^2 (1 - v_c) \right]^{1/3}}{0.2(1 - v_c^2)^{2/3} + 0.75(1 + v_c)^{2/3}(2 - v_c) + 1.02(1 - v_c^2)^{2/3} + 0.91(1 + v_c)^{2/3}(2 - v_c)^3}. \quad (17)$$

Для сравнения скоростей распространения сейсмических волн, полученных теоретическими путём, с экспериментальными данными использовались следующие характеристики материалов  $\rho_c = 2650 \text{ кг} / \text{м}^3$  – плотность песчинок кварцевого песка;  $E_c = 10^{11} \text{ Н} / \text{м}^2$  – модуль упругости кварца;  $\nu_c = 0.15$  – коэффициент Пуассона для песка;  $\tilde{\rho}_c = 0.74 \rho_c$  – плотность гранулированной среды.

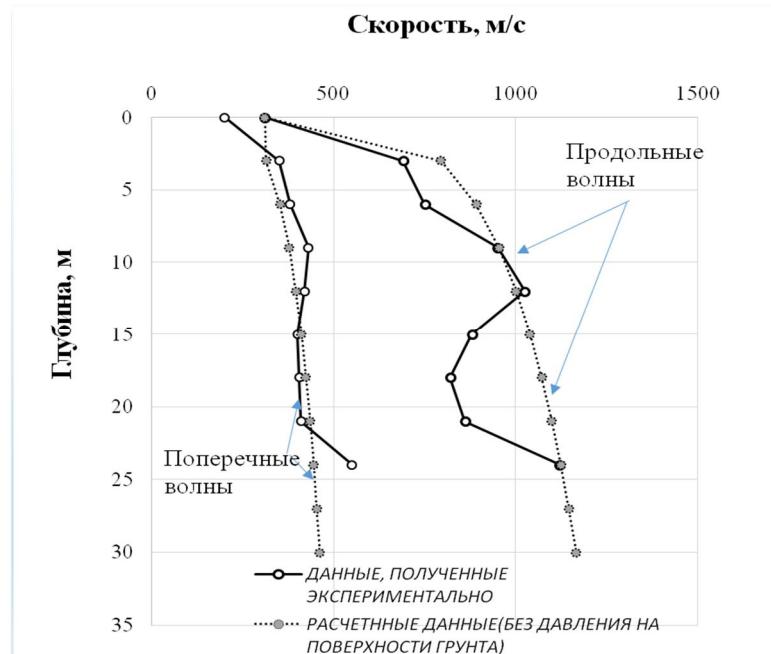


Рисунок 6 – Скорости распространения сейсмических волн в зависимости от глубины в гранулированных средах

Анализ теоретических и экспериментальных результатов показывает хорошее совпадение скоростей при распространении поперечных волн. Экспериментальные (замеренные) значения скоростей распространения продольных волн меньше теоретических значений.

Скорости распространения продольных и поперечных волн для кварцевого неконсолидированного песка:  $\alpha = 125.28\sqrt[6]{\tilde{p}}$  и  $\beta = 48.09\sqrt[6]{\tilde{p}}$ .

В заключение отметим, что модели сред, состоящие из одинаковых сфер, как отмечаются многими исследователями, достаточно хорошо описывают поведение неконсолидированных сред при распространении в них низкочастотных упругих волн.

#### Среда, состоящая из плотно упакованных сфер, расположенных в жидкости

Для решения задачи распространения волн напряжения в водонасыщенных средах применим допущение Гассмана [12, 13]. При этом считается, что относительное перемещение между жидкостью и скелетом пренебрежимо мало по сравнению с движением самой водонасыщенной породы, что интуитивно оправдано для низких частот.

При описании распространения плоских волн обычно применяются параметры Лямэ:  $\lambda$  и  $\mu$ , с использованием которых определяется модуль  $M = \lambda + 2\mu$ . Введём аналогичный параметр  $M_e$  для водонасыщенной среды. На основании предположения Гассмана упругие константы водонасыщенной среды определяются по формулам:

$$M_e = \tilde{E}_c + \frac{(\tilde{E}_c / 3k_c - 1)^2}{(1-\varphi)/k_c + \varphi/k_{\infty} - \tilde{E}_c / 3k_c^2}. \quad (18)$$

$$\mu_e = \tilde{\mu}_c$$

Так как модуль сдвига при заполнении пор жидкостью не изменяется, скорость  $\beta$  зависит только от плотности.

Таким образом, скорости распространения продольных и поперечных волн определяются выражениями:

$$\alpha_e = \sqrt{\frac{M_e}{\rho_e}} \quad (19)$$
$$\beta_e = \sqrt{\frac{\mu_e}{\rho_e}}$$

Если предположить, что предварительное нагружение обусловлено собственным весом вышележащих слоёв грунта и весом сооружения на поверхности, то величина среднего давления будет определяться выражением:  $p = \tilde{\rho}gH + P(H)$ , где  $g$  – ускорение свободного падения,  $H$  – расстояние от поверхности грунта,  $P(H)$  – давление от сооружения на глубине  $H$ .

### Вывод

Полученные формулы позволяют определить скорости распространения волн в водонасыщенных средах. Сравнение теоретических результатов с данными полевых испытаний для песчаных грунтов показывает хорошие совпадения теоретических результатов с экспериментальными. Знание скоростей распространения волн напряжений в таких средах необходимо для расчета на сейсмические воздействия тоннелей, расположенных на дне рек и проливов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nafe, John E., and Charles L. Drake: Variation with Depth in Shallow and Deep Water Marine Sediments of Porosity, Density, and the Velocities of Compressional and Shear Waves, Geophysics, vol. 22, pp. 523-552, 1957.
2. Shumway, George: Sound Velocity vs. Temperature in Water-saturated Sediments, Geophysics, vol. 23, pp. 494-505, 1958.
3. Sutton, George H., Hans Berckhemer, and John E. Nafe: Physical Analysis of Deep Sea Sediments, Geophysics, vol.22, pp. 779-812, 1957.
4. Urick, R. J.: A Sound Velocity Method for Determining the Compressibility of Finely Divided Substances, J. Appl. Phys., vol. 18, pp. 983-987, 1947.
5. Wyllie, M.R. J., A.R. Gregory, and L.W. Gardner: Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media, Geophysics, vol. 21, pp. 41-70, 1956.
6. Wood, A. B.: "A Textbook of Sound," G. Bell & Sons, Ltd., London 1941.
7. Особенности распространения волн напряжений в природных и искусственных гранулированных средах.
8. Тимошенко, С.П. Теория упругости: пер. с англ. / Под ред. Г.С. Шапиро, 2-е изд. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.
9. Роджерс, К. Укладки и покрытия [Текст] / К. Роджерс. – М.: Мир, 1968.
10. J. E. White Seismic waves: Radiation, Transmission and attenuation. Copyring 1965 by McGraw-Hill, Inc. Library of Congress Catalog Card Number 64-22962.
11. Mindlin R.D. Comphance of elastic bodies in contact. J. Appl. Mech. Trans. ASME, 71, 1949, 259-268.
12. Gassman F. Ober die Elastizität Poroser Medien. Vierteljahrsschr Naturforsch, Ges, Zurich, 96, 1951, 1-23.
13. Gassman F. Elastic waves through a packing of spheres Geophysics, 16 and 18, 1951b, 673-585 and 269.

### Курбатский Евгений Николаевич

Московский государственный университет путей сообщения, г. Москва  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты и тоннели»  
Email: usd.miit@gmail.com

### Нгуен Ван Хунг

Московский государственный университет путей сообщения, г. Москва  
Аспирант

E. KURBATSKIY, NGUYEN VAN HUNG

### DETERMINATION OF STRESS WAVE SPEED IN GRANULAR DRY AND WATER-SATURATED MEDIA

*A model of the granular medium, with a hexagonal packing of particles-balls of the same size is supposed. Formulas for velocities of stress waves propagation in dry and water-saturated environments are obtained. The results may be used to assess the effects of seismic waves on submerged tunnels at the bottom of rivers and straits. For skeletal (spheres) deformations determining the theory of Hertz is used.*

**Keywords:** *granular media, Hertz theory, water-saturated environment.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Nafe, John E., and Charles L. Drake: Variation with Depth in Shallow and Deep Water Marine Sediments of Porosity, Density, and the Velocities of Compressional and Shear Waves, *Geophysics*, vol. 22, pp. 523-552, 1957.
2. Shumway, George: Sound Velocity vs. Temperature in Water-saturated Sediments, *Geophysics*, vol. 23, pp. 494-505, 1958.
3. Sutton, George H., Hans Berckhemer, and John E. Nafe: Physical Analysis of Deep Sea Sediments, *Geophysics*, vol.22, pp. 779-812, 1957.
4. Urick, R. J.: A Sound Velocity Method for Determining the Compressibility of Finely Divided Substances, *J. Appl. Phys.*, vol. 18, pp. 983-987, 1947.
5. Wyllie, M.R. J., A.R. Gregory, and L.W. Gardner: Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media, *Geophysics*, vol. 21, pp. 41-70, 1956.
6. Wood, A. B.: "A Textbook of Sound," G. Bell & Sons, Ltd., London 1941.
7. Osobennosti rasprostranjenija voln naprijazhenij v prirodyh i iskusstvennyh granulirovannyh sredah.
8. Timoshenko, S.P. Teorija uprugosti: per. s angl. / Pod red. G.S. Shapiro, 2-e izd. – M.: Nauka. Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury, 1979. – 560 s.
9. Rodzher, K. Ukladki i pokrytija [Tekst] / K. Rodzher. – M.: Mir, 1968.
10. J. E. White Seismic waves: Radiation, Transmission and attenuation. Copyring 1965 by McGraw-Hill, Inc. Library of Congress Catalog Card Number 64-22962.
11. Mindlin R.D. Comphance of elastic bodies in contact. *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, 71, 1949, 259-268.
12. Gassman F. Ober die Elastizitat Poroser Medien. *Vierteljahrsschr Naturforsch, Ges, Zurich*, 96, 1951, 1-23.
13. Gassman F. Elastic waves through a packing of spheres *Geophysics*, 16 and 18, 1951b, 673-585 and 269.

**E. Kurbatskiy**

Moscow state university of railway engineering, Moscow  
Doctor of technical sciences, professor of the department «Bridges and tunnels»  
Email: usd.miit@gmail.com

**Nguyen Van Hung**

Moscow state university of railway engineering, Moscow  
Post graduate student

ОРЛОВИЧ Р.Б., ЗИМИН С.С., РУБЦОВ Н.М.

## О РАБОТЕ ОБЛИЦОВОЧНОГО КАМЕННОГО СЛОЯ НАРУЖНЫХ СТЕН КАРКАСНО-МОНОЛИТНЫХ ЗДАНИЙ ПРИ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

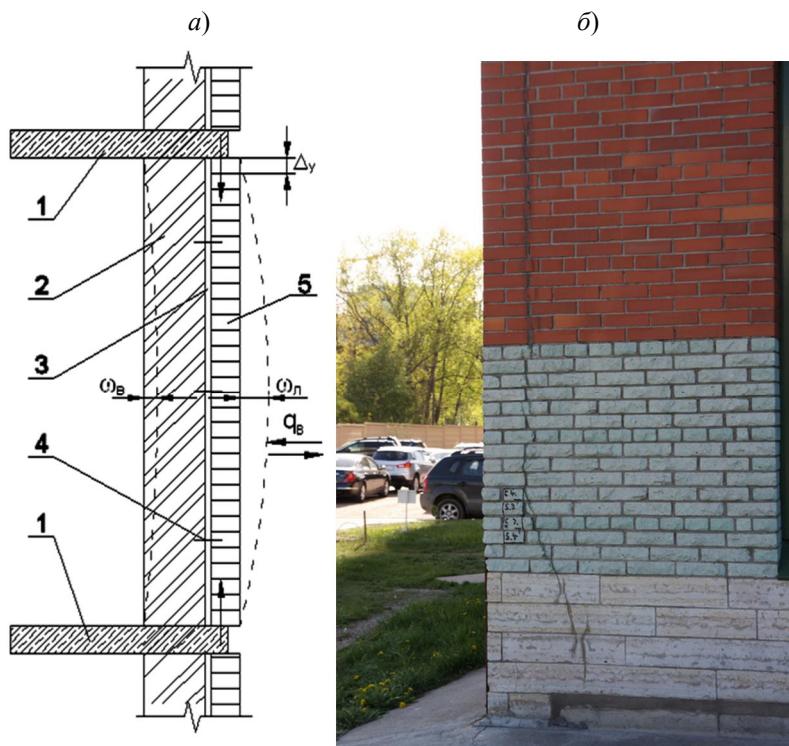
*Показано, что кроме температурных воздействий, дефектность облицовочного слоя связана также и с силовыми воздействиями, вызванными, главным образом, ветровыми нагрузками и деформациями в несущих конструкциях. При этом существенным оказываются условия сопряжения кладки с дисками перекрытий, в частности, наличие или отсутствие горизонтальных деформационных швов и эксцентризитет опирания кладки на диски перекрытий. Сделаны выводы о том, что в реальных условиях эксплуатации облицовочный кирпичный слой может работать в условиях сложного напряжённого состояния в своей плоскости и изгиба перпендикулярно вертикальной плоскости. Приведен краткий анализ существующих методов расчета облицовочного слоя, а также критерии прочности кладки; сделаны выводы о том, что существующие методы расчета облицовочного слоя силовые воздействия требуют дальнейшего совершенствования.*

**Ключевые слова:** каркасно-монолитные дома, лицевой кирпичный слой, слоистая кладка, ремонт.

Наружное стеновое ограждение каркасных зданий обычно выполняется в виде слоистой кладки с защитно-декоративной облицовкой из кирпича и внутренним слоем из газосиликатных или пенобетонных блоков, либо щелевых керамических камней, которыми заполняется пространство между монолитными плитами перекрытий и колоннами или поперечными железобетонными стенами. В отечественной практике кирпичный облицовочный слой, как правило, опирается на междуэтажные железобетонные перекрытия, а его крепление к внутреннему слою осуществляется с помощью гибких анкеров. Его основным назначением является защита несущего каркаса здания, внутреннего каменного слоя и утеплителя от внешних климатических воздействий. Дефектность облицовочного слоя в процессе эксплуатации в виде трещин и выкрашивания кладки обычно связывают с его температурными деформациями, либо размораживанием [1, 2]. В практике, несмотря на незначительный собственный вес, повреждения лицевого слоя могут быть связаны с силовыми воздействиями. Последние связаны с действием ветровых нагрузок и вынужденных деформаций, обусловленных перемещениями несущего каркаса здания.

Величина внутренних усилий в облицовке от указанных воздействий в значительной мере зависит от способа сопряжения кирпичного облицовочного слоя с дисками перекрытий. При наличии горизонтального деформационного шва между верхним диском перекрытия и облицовочным слоем в последнем возникают сжимающие усилия от действий собственного веса и изгибающие моменты из вертикальной плоскости, вызванные действием ветровой нагрузки. При этом роль опор играют нижний диск перекрытия и анкерные связи. При отсутствии горизонтальных деформационных швов лицевой слой оказывается защемлённым между дисками перекрытия. В этом случае в нём могут возникать сжимающие усилия, вызванные вертикальными осадками несущего железобетонного каркаса здания. Последние связаны с упругими деформациями от собственного веса здания и деформациями ползучести бетона.

В случае наиболее часто применяемого внецентренного опирания лицевого слоя на торцы дисков перекрытий в нём, кроме сжимающих усилий, возникают изгибающие моменты (рис. 1, а). Наибольшие вертикальные деформации Ду каркаса здания имеют место на нижних этажах. Как показывает опыт эксплуатации именно в этих зонах облицовочный кирпичный слой чаще всего подвержен разрушению в виде раздробления кирпичной кладки в местах контакта с дисками перекрытий и выпучиванию из вертикальной плоскости с образованием вертикальных трещин в угловых зонах (рис. 1, б).



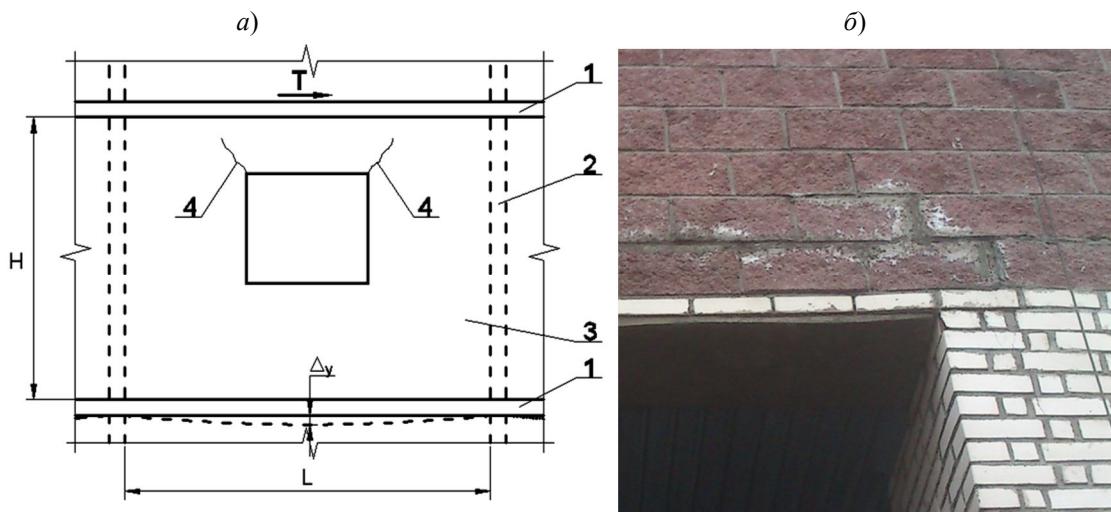
*Рисунок 1 – Схема работы защемлённого между дисками перекрытий лицевого каменного слоя (а) и его выпучивание из плоскости при внецентренном загружении (б); 1 – диски перекрытий; 2 – внутренний каменный слой; 3 – воздушный зазор; 4 – гибкие анкера; 5 – каменный лицевой слой*

Что касается ветровой нагрузки  $q_B$ , то её максимальные значения обычно имеют место в угловых зонах здания и на его верхних этажах. Следует отметить, что горизонтальные деформации (перемещения) облицовочного слоя от его внецентренного загружения сдерживаются гибкими акерными связями. Последние, однако, не являются неподвижными опорами, а обладают податливостью в горизонтальном направлении. Это обусловлено деформативностью анкеровки в лицевом и внутреннем слое, а также податливостью последнего при восприятии горизонтальных растягивающих усилий от анкеров, в связи с чем  $\omega_L > \omega_B$ . Следует отметить, что включение в совместную работу с лицевым слоем внутреннего слоя, выполненного из менее прочной теплоизоляционной кладки, является одной из причин наблюдаемого в нём образования трещин.

Облицовочный слой, расположенный на торцевых участках дисков перекрытий, может также работать на изгиб в вертикальной плоскости. В период возведения облицовки из-за деформативности свежих растворных швов её давление на перекрытие является равномерно распределённым. После набора прочности растворными швами облицовочный слой становится чувствительным к прогибам перекрытий, вызванным реогическими процессами в бетоне, а также действием полезных нагрузок. В результате между облицовкой и перекрытием образуется зазор, максимальное значение которого  $\Delta_y$  имеет место в середине пролёта плиты перекрытия (рис. 2, а). В результате перераспределения контактного давления облицовка работает как балка-стенка под действием собственного веса. Следует отметить, что аналогично работает и внутренний каменный слой стены. При этом последний, как более деформативный, будет частично передавать нагрузку от собственного веса на облицовочный слой через гибкие анкера. Степень дожгружения лицевого слоя внутренним будет тем больше, чем меньше толщина воздушного зазора, когда гибкие анкера способны воспринимать значительные сдвиговые усилия.

Кроме вышеперечисленных воздействий лицевой слой может также воспринимать сдвигающие усилия в своей плоскости, вызванные горизонтальными перемещениями каркаса здания, например от ветровой нагрузки, либо неравномерными осадками фундаментов [3]. Способность сопротивляться горизонтальным сдвиговым усилиям  $T$  (рис. 2, а) в наибольшей

степени проявляется в случае отсутствия горизонтальных деформационных швов между облицовочным слоем и верхним диском перекрытия. Сдвиговые деформации лицевого слоя приводят к его перекосам, что может вызвать появление в нем диагональных трещин [3].



*Рисунок 2 – Схема работы облицовочного слоя в его плоскости (а) с образованием косых трещин (б): 1 – диски перекрытий; 2 – внутренние поперечные стены; 3 – облицовочный кирпичный слой с оконными проёмами; 4 – трещины*

Таким образом, в реальных условиях эксплуатации облицовочный кирпичный слой может работать в условиях сложного напряжённого состояния в своей плоскости и изгиба перпендикулярно вертикальной плоскости. В последнем случае лицевой слой следует рассматривать как плиту, опёртую на дисках перекрытий, внутренние поперечные стены и податливые промежуточные опоры в виде анкерных стержней (рис. 2, а). Совершенно очевидно, что в общем случае напряжённо-деформированное состояние работающего лицевого слоя может быть определено только численными методами, например, методом конечных элементов. Учитывая возможности современного отечественного и зарубежного программного обеспечения, определение напряжённо-деформационного состояния на сегодняшний день не представляет технических сложностей. Проблемой является выбор критериальных оценок при проверках лицевого слоя по первому и второму предельным состояниям. В действующих нормативных документах последние чаще всего относятся к одноосным напряжённым состояниям. В тоже время отсутствуют критерии прочности для плоских видов напряжённого состояния. Приведённый в нормах [4] критерий расчёта каменных стен по главным растягивающим напряжениям не учитывает анизотропию прочности каменной кладки. Более сложные критерии, отражающие этот фактор, пока не нашли должного отражения в нормативной литературе [5, 6]. Поэтому, как в отечественных [4], так и в зарубежных нормах, например, Еврокодах [7], проверки прочности каменной кладки в условиях сложного напряжённого состояния сводятся к проверке одноосных напряжённых состояний: растяжения, сдвига, сжатия. При изгибе кладки перпендикулярно её плоскости условие прочности в соответствии с [7] записываются в виде (1-3):

$$M_{ed} \leq M_{rd}, \quad (1)$$

где в случае изгиба параллельно горизонтальным растворным швам:

$$M_{ed1} = \alpha_1 W_{ed} l^2, \quad (2)$$

в случае изгиба перпендикулярно горизонтальным растворным швам:

$$M_{ed2} = \alpha_2 W_{ed} l^2, \quad (3)$$

где  $l$  – расчётная длина стены;  $W_{ed}$  – нагрузка на единицу длины, действующая перпендикулярно плоскости стены;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты, зависящие от соотношения высоты к длине стены.

Несущая способность кладки при изгибе из плоскости определяется из выражения:

$$M_{rd} = f_{xd} Z, \quad (4)$$

где  $f_x$  – прочность складки при изгибе из плоскости по перевязанному ( $f_{x1}$ ), либо по неперевязанному ( $f_{x2}$ ) сечению;  $Z$  – коэффициент прочности сечения кладки вдоль либо поперёк горизонтальных растворных швов.

Применение формул (1-4) для расчёта на изгиб облицовочного слоя с податливыми опорами в виде гибких анкеров требуют уточнения коэффициентов  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $Z$ , что может быть достигнуто расчётным, либо экспериментальным путём. Как уже отмечалось, значение изгибающих моментов  $M_{ed1}$ ,  $M_{ed2}$  может быть определено методом конечных элементов [8].

Следует отметить, что как в отечественных, так и в зарубежных нормах отсутствует методика расчёта каменной облицовки каркасного здания как самостоятельной конструкции. Отсутствуют также данные о расчётной схеме облицовки, её совместной работе с внутренним слоем из каменной кладки, влиянии оконных и дверных проёмов, влиянии армирования и т.д. В тоже время приводятся отдельные указания относительно обеспечения требований второго предельного состояния: ширины раскрытия трещин и выгибов из плоскости, предельные значения которых не должны превышать 1/500 от высоты этажа; предельное значение ширины раскрытия трещин назначается из условия не проникновения атмосферных осадков внутрь толщины лицевого слоя и как следствие предупреждение его дальнейшего разрушения.

Из изложенного следует, что существующие методы расчета облицовочного слоя на силовые воздействия требуют дальнейшего совершенствования. Начатые авторами исследования в этом направлении, прежде всего, касаются облицовок в существующих зданиях. Их повышенная дефектность и аварийность предопределяет разработку неотложных мероприятий, направленных на увеличение долговечности и предотвращение обрушений фасадов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ищук, М.К. Отечественный опыт возведения зданий с наружными стенами из облегчённой кладки [Текст] / М.К. Ищук. – М.: РИФ «Стройматериалы». – 2009. – 360 с.
2. Гроздов, В.Т. О недостатках существующих проектных решений наружных навесных стен в многоэтажных монолитных железобетонных зданиях [Текст] / В.Т. Гроздов. // Дефекты зданий и сооружений. – СПб: ВИТУ. – 2006. – С. 15-21.
3. Деркач, В.Н. Несущая способность каменного заполнения каркасных зданий [Текст] / В.Н. Деркач, Р.Б. Орлович // Строительство и реконструкция. – Орел: ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК». – 2011. – №3. – С. 3-8.
4. СНиП II-22-81\* Каменные и армокаменные конструкции Госстрой СССР. – М.: Стройиздат. – 1983. – 40 с.
5. Орлович, Р.Б. Анизотропия прочности каменной кладки из кладочных элементов с щелевыми вертикальными пустотами [Текст] / Р.Б. Орлович, А.Я. Найчук, В.Н. Деркач // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2010. – №3 – С. 35-38.
6. Орлович, Р.Б. Критерии прочности, применяемые в зарубежной практике расчёта [Текст] / Р.Б. Орлович, В.Н. Деркач // Известия ВУЗов. – 2011. – №6. – С. 101-106.
7. EN 1996 – 1:2006 Eurocode 6: Design of masonry structures.
8. Jager W., Thime M. Bemessung von horizontal beanspruchten Mauerwerk nach EN 1996-1-1 mit Hilfe modifizierten Momentenverteilungszahlen. Mauerwerk. – 2005. – №1. – S. 8-13.

#### Орлович Ромуальд Болеславович

Западно-Померанский технологический университет, г. Щецин, Республика Польша  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции»  
E-mail: orlowicz@mail.ru

#### Зимин Сергей Сергеевич

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, г. Санкт-Петербург  
Аспирант  
Тел.: +7 921 347 77 01  
E-mail: zimin\_sergei@mail.ru

#### Рубцов Никита Михайлович

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, г. Санкт-Петербург  
Аспирант кафедры «Строительная механика и строительные конструкции»  
Тел.: +7 921 408 74 64  
E-mail: kit451@mail.ru

## **WORK STONE FACING LAYER OF EXTERNAL MULTI-LAYER WALLS OF FRAME-MONOLITHIC MULTI-STORY BUILDING AT FORCE EFFECTS**

*It is shown that besides temperature effects, the defectiveness facing layer is also related with force impacts caused mainly by wind loads and deformations in load-bearing structures. In this case, the conjugation conditions masonry with discs overlap are essential, in particular, the presence or absence of horizontal joints and masonry bearing eccentricity on disks overlap. Conclusions about the fact that in real-life conditions facing brick layer can operate in complex stress state in the plane and perpendicular to the vertical plane of bending. A brief analysis of existing methods of calculation facing layer, as well as the strength criteria of masonry; conclusions that the existing methods of calculation facing layer force impacts require further improvement.*

**Keywords:** framed buildings, outside brick layer, multilayered brickwork, maintenance

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Ishhuk, M.K. Otechestvennyj opyt vozvedenija zdanij s naruzhnymi stenami iz oblegchjonnoj kladki [Tekst] / M.K. Ishhuk. – M.: RIF «Strojmaterialy». – 2009. – 360 s.
2. Grozdov, V.T. O nedostatkah sushhestvujushhih proektnyh reshenij naruzhnyh navesnyh sten v mnogojetazhnyh monolitnyh zhelezobetonnyh zdaniyah [Tekst] / V.T. Grozdov. // Defekty zdanij i sooruzhenij. – SPb: VITU. – 2006. – S. 15-21.
3. Derkach, V.N. Nesushhaja sposobnost' kamennogo zapolnenija karkasnyh zdanij [Tekst] / V.N. Derkach, R.B. Orlovich // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: FGOU VPO «Gosuniversitet-UNPK». – 2011. – №3. – S. 3-8.
4. SNiP II-22-81\* Kamennye i armokamennye konstrukcii Gosstroj SSSR. – M.: Strojizdat. – 1983. – 40 s.
5. Orlovich, R.B. Anizotropija prochnosti kamennoj kladki iz kladochnyh jelementov s shhelevymi vertikal'nymi pustotami [Tekst] / R.B. Orlovich, A.Ja. Najchuk, V.N. Derkach // Stroitel'naja mehanika i raschjot sooruzhenij. – 2010. – №3 – S. 35-38.
6. Orlovich, R.B. Kriterii prochnosti, primenjaemye v zarubezhnoj praktike raschjota [Tekst] / R.B. Orlovich, V.N. Derkach // Izvestija VUZov. – 2011. – №6. – S. 101-106.
7. EN 1996 – 1:2006 Eurocode 6: Design of masonry structures.
8. Jager W., Thime M. Bemessung von horizontal beanspruchten Mauerwerk nach EN 1996-1-1 mit Hilte modifizierten Momentenverteilungszahlen. Mauerwerk. – 2005. – №1. – S. 8-13.

#### **R. Orlovich**

West Pomeranian technological university, Szczecin, Republic Poland  
Doctor of technical science, professor, head of the department «Building designs»  
E-mail: orlowicz@mail.ru

#### **S. Zimin**

Saint-Petersburg state polytechnical university, Saint-Petersburg  
Post graduate student  
Ph.: +7 921 347 77 01  
Mail: zimin\_sergei@mail.ru

#### **N. Rubcov**

Saint-Petersburg state polytechnical university, Saint-Petersburg  
Post graduate student of the department «Structural mechanics and units»  
Ph.: +7 921 408 74 64  
Mail: kit451@mail.ru

ТУРКОВ А.В., МАРФИН К.В.

## **МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ИСПЫТАНИЯ ИЗОТРОПНЫХ СОСТАВНЫХ ПЛАСТИН НА ПОДАТЛИВЫХ СВЯЗЯХ**

*Приводится методика проведения статического и динамического испытания составных пластин на податливых связях. Описан испытательный стенд для проведения эксперимента, предлагаются способы задания шарнирного и жесткого защемления квадратной пластины по контуру. Описывается методика и определяется кратковременный модуль упругости при изгибе древесноволокнистой плиты. Построен график зависимости «нагрузка – прогиб» при экспериментальном определении модуля упругости.*

**Ключевые слова:** составная пластина, статические испытания пластины, динамические испытания пластины, моделирование шарнирного опирания, моделирование жесткого защемления, кратковременный модуль упругости.

Целью данной работы являлась разработка методики, направленная на определение прогиба и частот собственных колебания двухслойной составной пластины на податливых связях.

Для исследования пластинок был создан испытательный стенд, представляющий собой пространственную раму, состоящую из вертикальных стоек с закрепленной на них горизонтальной рамой, выполненной из стальных горячекатанных равнополочных уголков  $40 \times 4$  мм, соединенных между собой болтами (рис. 1, а). К стойкам приварены ножки, выполненные из стальной пластинки сечением  $200 \times 200$  и толщиной 6 мм. Стенд установлен на стальной плите толщиной 10 мм. План испытательного стендса изображен на рисунке 1, б и 1, в. На рисунке 1, б изображен план в уровне горизонтальной связи, на рисунке 1, в – план в уровне нижней неподвижной рамы стендса. На рисунке 1, г изображен разрез 1-1 стендса.

### **А) Методика проведения статических испытаний**

Одной из задач экспериментальных исследований являлось определение максимального прогиба составной пластиинки от действия статической нагрузки. Для определения прогиба пластина загружалась равномерно распределенной нагрузкой. Для моделирования равномерно распределенной нагрузки использовались запаянные полиэтиленовые пакеты с песком (рис. 3), вес каждого из которых составлял 10 Н. Загружение осуществлялось в четыре ступени, на каждой из которых на верхнюю пластиинку укладывались пакеты с песком общим весом 250 Н. Для определения прогиба в середину пролёта составной пластиинки устанавливался индикатора часового типа ИЧ-25 с ценой деления 0,01 мм на штативе (рис. 4).

В ходе проведения эксперимента моделировались два условия закрепления пластиин по контуру. Пластины закрепляли между горизонтальными рамами уголками по одному из двух вариантов (рис. 2).

После снятия показания по индикатору от максимальной нагрузки, которая составляла 1,00 кН, пластина разгружалась, и после пятнадцати минут «отдыха» загружалась вновь. Для каждого типа составной пластиинки (количество и диаметр нагелей, условия закрепления) испытания проводились не менее трёх раз до получения стабильных значений экспериментальных прогибов.

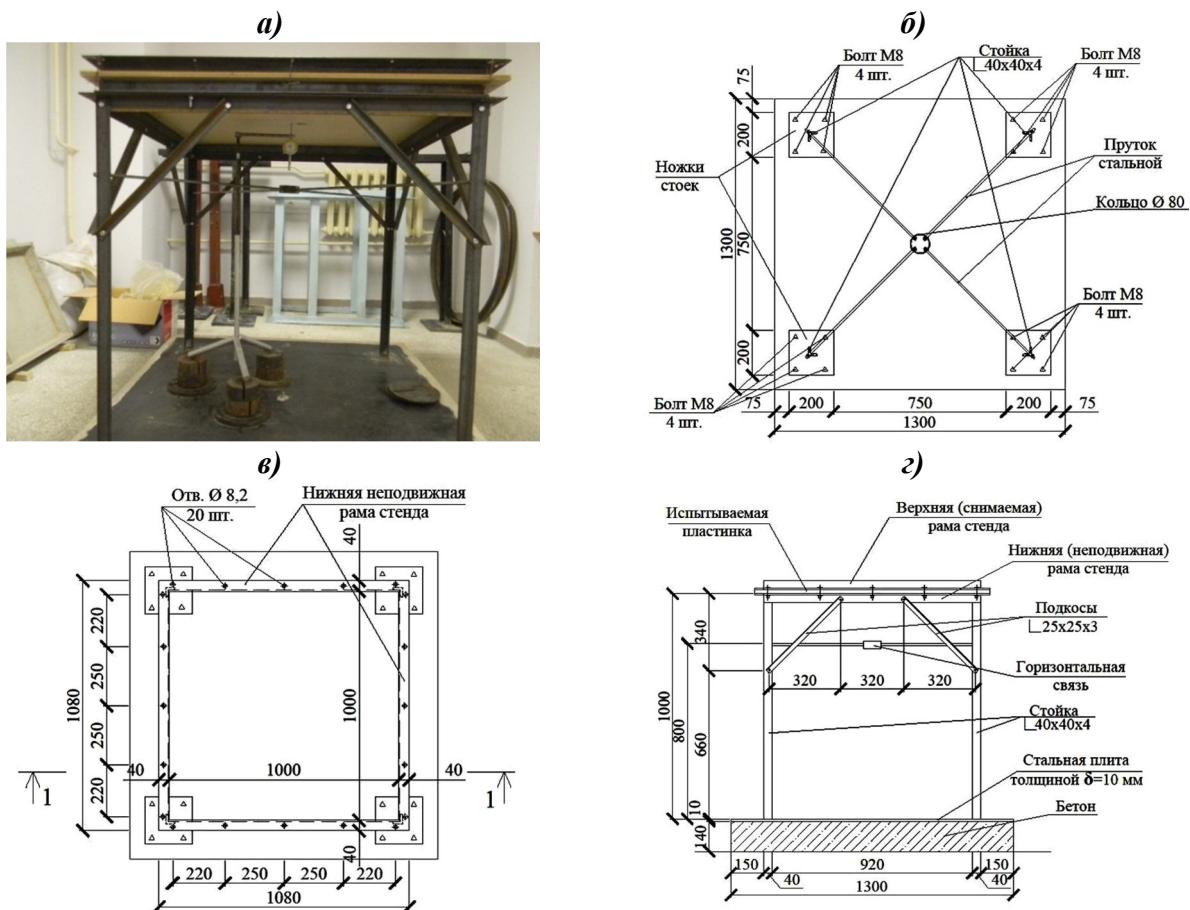
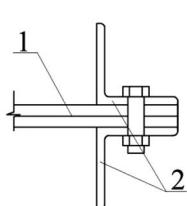
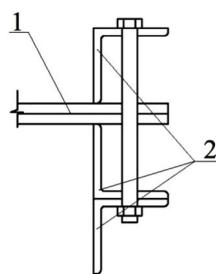


Рисунок 1 – Испытательный стенд: а – общий вид (фотография); б – план в уровне горизонтальной связи стенда; в – план в уровне нижней неподвижной рамы стендса; г – разрез 1-1 стендса



а) Жесткое защемление



б) Шарнирное опирание

Рисунок 2 – Условия закрепления составной пластины по контуру:  
1 – испытываемая составная пластина; 2 – уголки верхней и нижней горизонтальных рам



Рисунок 3 – Моделирование равномерно распределенной нагрузки



Рисунок 4 – Индикатор часового типа ИЧ-25

### Б) Методика проведения динамических испытаний

В ходе проведения динамических испытаний определялись основные частоты собственных колебаний двухслойной изотропной пластины в зависимости от количества и диаметра нагелей и условий закрепления. Измерения основных частот колебаний выполнялись при помощи вибранализатора «ВИБРАН – 2.0». Датчик закреплялся снизу в центре пластиинки, а сверху производился удар резиновой киянкой.

Значения частот собственных круговых колебаний находились из виброграмм за интервал времени в 1 с, исключая переходной процесс стабилизации колебаний, по формуле:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n. \quad (1)$$

где  $n$  – число полных колебаний за интервал времени  $t = 1$  с.

Для каждого типа составной пластиинки динамические испытания проводились также не менее трёх раз до получения стабильных значений экспериментальных круговых частот колебаний.

### В) Методика и результаты определения кратковременного модуля упругости древесноволокнистой плиты

Для определения действительного модуля упругости древесноволокнистой плиты была изготовлена испытательная установка в соответствии с ГОСТ 10635-88, представленная на рисунке 5. Образцы для испытаний вырезались из обоих слоёв предварительно испытанной составной пластиинки как вдоль первоначального листа древесноволокнистой плиты, так и поперёк (рис. 6).

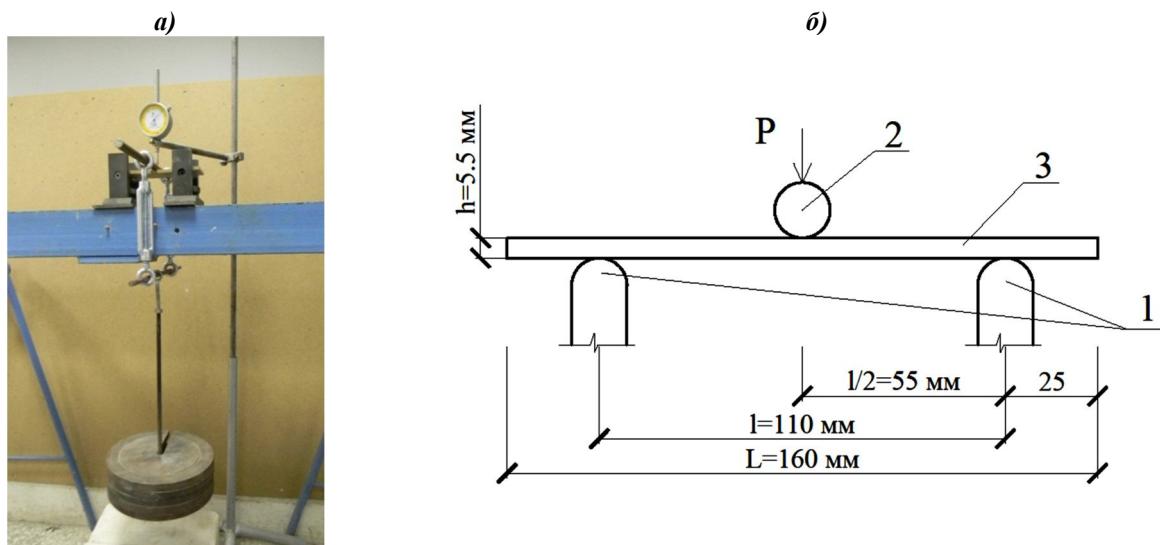


Рисунок 5 – Установка для определения кратковременного модуля упругости древесноволокнистой плиты (а – общий вид установки; б – схема нагружения образца)

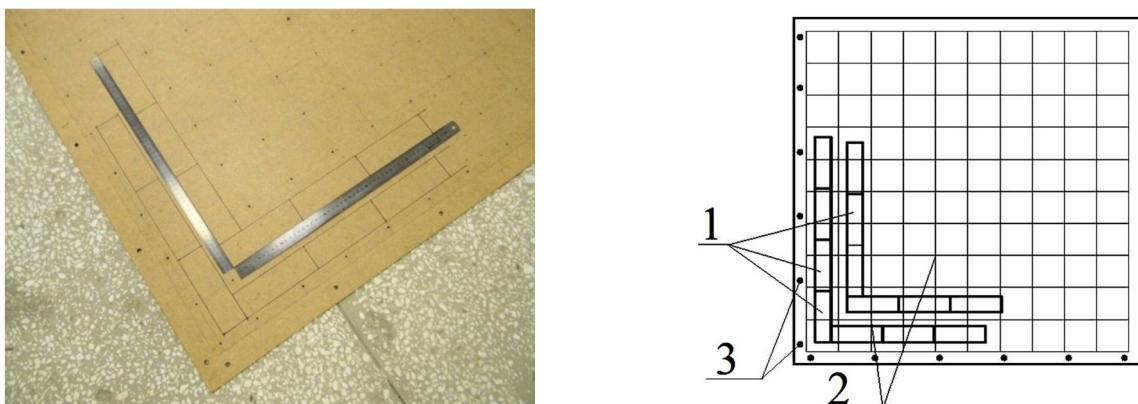


Рисунок 6 – Раскрой образцов для определения кратковременного модуля упругости древесноволокнистой плиты (1 – образцы для испытаний; 2 – существующая сетка отверстий под нагели; 3 – отверстия под нагели на опоре)

Ширина образцов составляла 50 мм, а длина 20-кратна толщине плюс 50 мм, что составляет 160 мм. Согласно изменения №1 ГОСТ 10635-88, пункт 3.5 скорость нагружения составила 1...2 мм/мин. и снимались не менее 8 показаний индикатора часового типа (ИЧ-25 кл. 1 с ценой деления 0,01 мм, диапазон измерений – 25 мм) через равные интервалы приращения нагрузки, составлявшие 15 Н. Максимальная нагрузка – 150 Н, что составляет 33,3% разрушающей нагрузки равной в среднем 450 Н и определенной для трех образцов. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Показания индикатора часового типа и вычисленные прогибы при экспериментальном определении модуля упругости

№ образца	Показания индикатора часового типа и прогибы $S$ (мм) при нагрузки $F$ (Н)										
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
1	1541	<u>1532</u> 0,09	<u>1523</u> 0,18	<u>1508</u> 0,33	<u>1493</u> 0,48	<u>1481</u> 0,61	<u>1468</u> 0,73	<u>1452</u> 0,89	<u>1436</u> 1,05	<u>1424</u> 1,17	<u>1412</u> 1,29
2	1511	<u>1499</u> 0,13	<u>1486</u> 0,25	<u>1472</u> 0,39	<u>1458</u> 0,53	<u>1444</u> 0,67	<u>1430</u> 0,81	<u>1414</u> 0,97	<u>1398</u> 1,13	<u>1383</u> 1,29	<u>1367</u> 1,44
3	1544	<u>1530</u> 0,14	<u>1516</u> 0,28	<u>1501</u> 0,43	<u>1486</u> 0,58	<u>1469</u> 0,75	<u>1452</u> 0,92	<u>1438</u> 1,06	<u>1424</u> 1,20	<u>1408</u> 1,36	<u>1392</u> 1,52
4	1537	<u>1522</u> 0,15	<u>1507</u> 0,30	<u>1492</u> 0,45	<u>1477</u> 0,60	<u>1465</u> 0,72	<u>1453</u> 0,84	<u>1434</u> 1,03	<u>1415</u> 1,22	<u>1399</u> 1,39	<u>1382</u> 1,55
5	1528	<u>1517</u> 0,12	<u>1505</u> 0,23	<u>1489</u> 0,39	<u>1473</u> 0,55	<u>1459</u> 0,70	<u>1444</u> 0,84	<u>1428</u> 1,00	<u>1412</u> 1,16	<u>1396</u> 1,32	<u>1380</u> 1,48
6	1528	<u>1520</u> 0,08	<u>1512</u> 0,16	<u>1498</u> 0,30	<u>1484</u> 0,44	<u>1470</u> 0,58	<u>1456</u> 0,72	<u>1444</u> 0,85	<u>1431</u> 0,97	<u>1417</u> 1,12	<u>1402</u> 1,26
7	1517	<u>1504</u> 0,14	<u>1490</u> 0,27	<u>1476</u> 0,42	<u>1461</u> 0,56	<u>1447</u> 0,71	<u>1432</u> 0,85	<u>1418</u> 0,99	<u>1404</u> 1,13	<u>1389</u> 1,29	<u>1373</u> 1,44
8	1495	<u>1483</u> 0,12	<u>1471</u> 0,24	<u>1456</u> 0,39	<u>1441</u> 0,54	<u>1426</u> 0,69	<u>1411</u> 0,84	<u>1394</u> 1,02	<u>1376</u> 1,19	<u>1360</u> 1,35	<u>1344</u> 1,51
9	1496	<u>1485</u> 0,11	<u>1474</u> 0,22	<u>1461</u> 0,36	<u>1447</u> 0,49	<u>1435</u> 0,61	<u>1423</u> 0,73	<u>1406</u> 0,91	<u>1388</u> 1,08	<u>1371</u> 1,25	<u>1354</u> 1,42
10	1492	<u>1477</u> 0,15	<u>1462</u> 0,30	<u>1448</u> 0,45	<u>1433</u> 0,59	<u>1418</u> 0,74	<u>1403</u> 0,89	<u>1389</u> 1,04	<u>1374</u> 1,18	<u>1359</u> 1,34	<u>1343</u> 1,49
$S_{cp}$ , мм	-	0,122 $\pm 0,017$	0,243 $\pm 0,034$	0,390 $\pm 0,035$	0,536 $\pm 0,037$	0,677 $\pm 0,042$	0,817 $\pm 0,049$	0,974 $\pm 0,051$	1,130 $\pm 0,056$	1,290 $\pm 0,062$	1,440 $\pm 0,069$
$v$		1,75	1,75	1,82	1,85	1,63	1,4	1,82	2,07	1,98	1,87
$E$ , МПа	-	-	-	4478	4096	4181	4270	4034	3822	3852	3883

Примечание: в числителе приведены отсчеты по прибору, в знаменателе – прогибы.

В ходе статической обработки результатов измерения задались доверительной вероятностью  $p_d=0,95$  [1]. Также вычислялось наибольшее нормированное отклонение  $v$ :

$$v = \frac{\max |X_i - \bar{X}|}{\sigma}, \quad (2)$$

где  $X_i$  – результаты измерений;  $\bar{X}$  – средняя величина результата измерения;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение.

При проведении статистической обработки результатов испытаний было выявлено, что полученное значение наибольшего нормированного отклонения меньше максимально допустимого  $v < v_q = 2,294$ . Таким образом, все результаты испытаний являются достоверными.

По данным таблицы 1 построен график «нагрузка – прогиб» (рис. 7), где прогиб принимался по средним значениям для 10 образцов при каждом этапе нагружения.

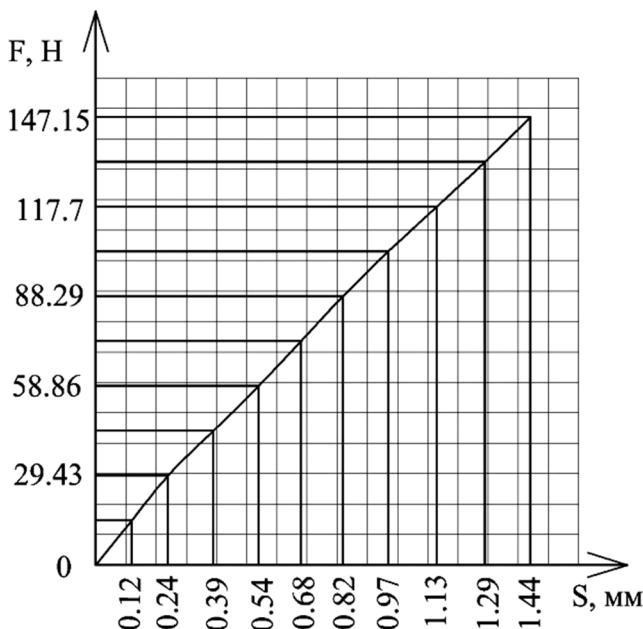


Рисунок 7 – Зависимость «нагрузка – прогиб» при экспериментальном определении модуля упругости

По графику можно сделать вывод о линейной зависимости прогиба ( $S$ ) от нагрузки ( $F$ ).

Модуль упругости при изгибе в таблице 1 в соответствие с ГОСТ 10635-88 вычислялся по формуле (МПа):

$$E_i = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{4bh^3(S_2 - S_1)}, \quad (3)$$

где  $l$  – расстояние между опорами испытательного устройства, мм;  $b$  – ширина образца, мм;  $h$  – толщина образца, мм;  $(F_2 - F_1)$  – фиксированное (3 интервала) приращение нагрузки, Н;  $(S_2 - S_1)$  – приращение прогиба, соответствующее фиксированному приращению нагрузки, определяемому по таблице (графику) с точностью до 0,01 мм.

Модуль упругости в интервале приращения нагрузки 15-45 Н является ошибкой в серии, это связано со смятием ДВП на опоре и под ножом установки. Поэтому удаляем этот результат из серии и находим среднее арифметическое для модуля упругости по 7 результатам.

По результатам вычислений модуль упругости  $E$  для древесноволокнистой плиты составил  $E = 4020$  МПа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нефедов, В. И. Метрология и радиоизмерение [Текст] / В.И. Нефедов, А.С. Сигов, В.К. Битюков, В.И. Хахин – М.: Высшая школа. – 2006. – 518 с.

### Турков Андрей Викторович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
E-mail: aturkov@bk.ru

### Марфин Кирилл Васильевич

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Инженер  
E-mail: marfinkirill@yandex.ru

A. TURKOV, K. MARFIN

## **THE EXPERIMENTAL TECHNIQUE FOR STATIC AND DYNAMIC TESTS ISOTROPIC COMPOSITE PLATES ON PLIABLE LINKS**

*The technique of carrying out static and dynamic tests of composite plates on the connections of pliable. Describes the test stand for the experiment, offers ways job articulated and hard crushing of a square plate contour. Explains the methodology and define briefly the elastic modulus Flexural wood-fiber plates. Built plot of «the Load – deflection», in experimental determination of modulus of elasticity.*

**Keywords:** composite plate, static test plate, dynamic test plate, modeling swivel bearing, modeling hard crushing, intermittent modulus.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Nefedov, V. I. Metrologija i radioizmerenie [Tekst] / V.I. Nefedov, A.S. Sigov, V.K. Bitjukov, V.I. Hahin – M.: Vysshaja shkola. – 2006. – 518 s.

**A. Turkov**

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

**K. Marfin**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Engineer  
E-mail: oantc@mail.ru

УДК 614.8.086.5

ВАСИЛЬЕВ А.В.

## **ПРОБЛЕМА ОБЛУЧЕНИЯ РАДОНОМ В СОВРЕМЕННЫХ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЯХ**

*Согласно проведенному исследованию концентрации радона в помещениях современных многоэтажных зданий значительно превышают среднюю концентрацию радона в домах г. Екатеринбурга, построенных до введения требований к энергосберегающему строительству. Установлено преобладание диффузионного механизма поступления радона в современных городских жилищах, при этом повышенные концентрации радона и высокий вклад диффузии вызваны низкой кратностью воздухообмена в помещениях.*

**Ключевые слова:** радон, скорость поступления радона, кратность воздухообмена.

### **Введение**

В последние годы значительное внимание уделяется проблеме облучения населения радоном в контексте мер по увеличению энергосбережения в строительстве. Снижение суммарного удельного расхода тепловой энергии достигается применением соответствующих архитектурно-строительных решений, вследствие применения которых происходит снижение воздухопроницаемости ограждающих конструкций. В результате снижается кратность воздухообмена и создаются условия для накопления радона в воздухе жилищ. Повышение накопления радона в результате снижения воздухообмена в современных зданиях показано во многих странах [1]. Однако в отличие от европейских стран, США и Канады актуальность проблемы потенциальной радиоопасности современных зданий в России в большей степени связана с многоэтажными городскими зданиями, для которых механизмы поступления и накопления радона недостаточно изучены. В связи с этим разработка метода оценки параметров поступления и стока радона, а также выявление определяющих факторов, влияющих на динамику концентрации радона в помещениях современных многоэтажных зданий, являются актуальными задачами.

Задача снижения неприемлемых уровней риска требует, в первую очередь, уменьшения концентраций радона в помещениях с его высоким содержанием. Однако сама по себе оценка концентрации радона не дает полного представления о применимости тех или иных мер. Корректирующие меры будут эффективны только при достоверной информации о механизмах и путях поступления радона.

### **1. Материалы и методы**

#### **1.1 Радоновое обследование г. Екатеринбурга**

Закономерности поступления и стока радона в современных зданиях исследовались на примере г. Екатеринбурга, Свердловской области. Свердловская область – один из наиболее изученных регионов России в отношении облучения населения природными источниками. Здесь только в рамках специальных радоновых обследований проведены измерения концентрации радона более чем в 2,5 тыс. жилых зданий.

Исследование было проведено на основании совместного анализа данных радонового обследования г. Екатеринбурга, проведенного Институтом промышленной экологии УрО РАН в 2007-2008 гг. [2, 3], и результатов дополнительных измерений, проведенных в рамках настоящей работы. Выборка в общей сложности составила 430 помещений многоквартирных домов (по одному помещению в каждом доме). В качестве выборки, характеризующей современные здания, были выбраны жилые многоэтажные дома, построенные после 2000 года.

Для проведения дополнительных измерений использовались те же, что и в работах [2, 3] интегрирующие методы измерения концентрации радона с использованием твердотельных трековых детекторов (ТД) альфа-частиц [4]. Данные методы рекомендованы НКДАР ООН и ВОЗ для проведения национальных и региональных радоновых обследований.

## 1.2 Определение механизмов поступления радона и параметров воздухообмена

Для решения задачи выявления доминирующего механизма поступления радона (диффузионного или конвективного) был разработан метод оценки характерных параметров, определяющих концентрации радона в помещении [5, 6]. Суть разработанного подхода к определению механизмов и параметров поступления радона заключается в непрерывном измерении концентрации радона и разности температур снаружи и внутри помещения с шагом в один час. Такие условия проведения измерений необходимы для отслеживания динамики концентрации радона при переходе помещения из активного режима эксплуатации (при активной деятельности человека в помещении) в стационарное состояние (когда люди покидают помещение в конце рабочего дня или ложатся спать).

Накопление радона для стационарного режима эксплуатации помещения представляет собой процесс с выходом на насыщение. При этом выход значения концентрации радона в помещении на равновесие определяется некоторыми постоянными параметрами (скоростью поступления радона и кратностью воздухообмена (КВО)). Для оценки данных параметров необходимо математически описать процесс изменения концентрации радона во времени.

Временная зависимость концентрации радона  $A(t)$  в помещении может быть представлена в виде известного дифференциального уравнения первого порядка (предполагается, что радон перемешивается мгновенно по всему объему помещения):

$$\frac{dA(t)}{dt} = \sum_i S_i + \lambda_v \cdot A_{Rn}^{attm} - A(t) \cdot (\lambda_{Rn} + \lambda_v), \quad (1)$$

где  $S_i$  – удельное поступление радона из  $i$ -го источника в единичный объем помещения,  $\text{Бк}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ ;  $\lambda_v$  – КВО в помещении,  $\text{ч}^{-1}$ ;  $\lambda_{Rn} = 0,00755 \text{ ч}^{-1}$  – постоянная распада радона;  $A_{Rn}$  – концентрация радона в наружном воздухе,  $\text{Бк}/\text{м}^3$ .

Реализация математического решения уравнения (1) для различных режимов эксплуатации помещения и описание метода определения скорости поступления радона и его стока детально приведены в работах [5-7]. В настоящей работе мы остановимся на определении доминирующего механизма поступления радона на основании зависимости скорости поступления радона от разности температур между внутренним объемом помещения и наружной атмосферой  $\Delta T = T_{in} - T_{out}$ . Суммарная скорость поступления радона  $S_0$  в определенный момент времени обусловлена двумя основными механизмами: диффузионным и конвективным:

$$S_0 = S_D + S_C, \quad (2)$$

где  $S_D$  и  $S_C$  – соответственно скорости диффузионного и конвективного поступления радона в помещение,  $\text{Бк}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ .

Диффузионный механизм поступления радона подробно рассмотрен в работе Э.М. Крисюка [8]. Для описания скорости диффузионного поступления радона,  $S_D$ , вводят в рассмотрение плотность потока радона (скорость эксхаляции радона)  $q$ , так что:

$$S_D = \frac{\sum_j q_j \cdot \Pi_j}{V}, \quad (3)$$

где  $q_j$  – скорость эксхаляции радона с  $j$ -ой поверхности,  $\text{Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , площадь которой равна  $\Pi_j$ ,  $\text{м}^2$ ;  $V$  – объем помещения,  $\text{м}^3$ .

Скорость эксхаляции радона можно непосредственно связать с удельной активностью радио-226 в строительном материале [8, 9]:

$$q = C_{Ra} \rho E \sqrt{\frac{\lambda_{Rn} D_e}{\varepsilon}} \operatorname{th} \left( d \sqrt{\frac{\lambda_{Rn} \varepsilon}{D_e}} \right), \quad (4)$$

где  $C_{Ra}$  – удельная активность радия-226 в материале слоя, Бк/кг;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $E$  – коэффициент эманирования радона;  $D_e$  – коэффициент диффузии в материале слоя, м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $\varepsilon$  – пористость материала;  $d$  – половина толщины слоя материала, м.

Базовый подход к описанию скорости конвективного поступления радона в помещение основывается на простой аналогии потока, вызванного разностью давлений [10]. В этом случае скорость конвективного поступления радона ( $S_C$ ) описывается формулой [11]:

$$S_C = A_C \frac{\Delta P}{R_c} V^{-1}, \quad (5)$$

где  $A_C$  – концентрация радона в конвективном потоке воздуха, Бк/м<sup>3</sup>;  $\Delta P$  – разность давлений, обуславливающая конвективный поток, Па;  $R_c$  – общее сопротивление конструкции здания поступлению конвективного потока воздуха, Па·ч·м<sup>-3</sup>. Параметры в правой части уравнения непосредственно зависят от того, какая среда или пространство является источником конвективного потока воздуха. Это может быть подпольное пространство под зданием или другое помещение.

Более детальные модели конвективного механизма поступления радона в помещение основываются на введении в рассмотрение специфических параметров, характеризующих конкретные свойства здания и климатические условия [10-12]. Так, например, в рамках модели, используемой в Финском Центре радиационной и ядерной безопасности [11], разность давлений в почвенном воздухе и в помещении на уровне пола связывается с разностью температур в помещении ( $T_{in}$ ) и в наружной атмосфере ( $T_{out}$ ) и уровнем нейтрального давления  $H_{npl}$  (Neutral Pressure Level), на котором достигается равенство давлений внутри и снаружи здания:

$$\Delta P = \rho_0 \cdot g \cdot H_{npl} \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}}, \quad (6)$$

где  $\rho_0$  – плотность воздуха при нормальном давлении, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

В [12, 13] ключевыми характеристиками здания выступают эффективная площадь натекания  $\Pi_{ham}^{\text{эфф}}$  и площадь натекания радона  $\Pi_{ham}^{Rn}$ . Эффективная площадь натекания  $\Pi_{ham}^{\text{эфф}}$  показывает площадь открытых участков в оболочке здания, через которые воздух может поступать или выходить из здания. Введение и широкое использование параметра  $\Pi_{ham}^{\text{эфф}}$  тесно связано с тем, что была создана и отработана экспериментальная процедура его измерения при помощи нагнетательной двери (аэродвери). По аналогии с эффективной площадью натекания, для описания конвективного переноса радона в здание используется такое понятие, как площадь натекания радона  $\Pi_{ham}^{Rn}$ . Согласно [12] скорость конвективного поступления радона  $S_C$ , обусловленная эффектом дымовой трубы (стек-эффектом), может быть выражена через площадь натекания радона  $\Pi_{ham}^{Rn}$  и показатель степени  $n_r$ , зависящий от аэродинамических характеристик мест инфильтрации и эксфильтрации воздуха в здании:

$$S_C = A_C \cdot \Pi_{ham}^{Rn} \cdot v_0 \cdot \left( \frac{\Delta \rho g H}{P_0} \right)^{n_r} V^{-1}, \quad (7)$$

где  $H$  – высота здания, а разность плотностей воздуха  $\Delta \rho = \rho_0 \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}}$  определяется через

разность температур внутри здания и вне него;  $v_0$  – скорость инфильтрации воздуха, связанная с величиной давления  $P_0$ , м/с.

Приведенные подходы к моделированию конвективного поступления дают возможность делать принципиальные выводы о зависимости концентрации радона в помещении от разности температур между внутренним объемом помещения и наружной атмосферой. В частности, в работе [11] модель, разработанная в Финском Центре радиационной и ядерной безопасности, была использована для изучения сезонных вариаций концентрации радона.

Теоретические представления и экспериментальные данные о связи скорости поступления радона с разностью температур  $\Delta T$  позволяют предложить метод определения вклада диффузионного и конвективного механизма поступления радона в помещение на основании изучения зависимости концентрации радона от разности температур между внутренним объемом помещения и внешней атмосферой.

Скорость поступления радона  $S_0$  для  $\Delta T \neq 0$  обусловлена суммарным диффузионным и конвективным поступлением радона в помещение. В силу того, что механизм конвективного поступления радона в помещение определяется разностью температур  $\Delta T$ , при  $\Delta T = 0$  вклад этого механизма в суммарную скорость поступления можно исключить. Поэтому скорость поступления радона  $S_0$  при  $\Delta T=0$  будет соответствовать скорости диффузионного поступления радона. Зависимость скорости поступления радона в помещение  $S_0$  для различных разностей температур  $\Delta T$  позволяет установить доминирующий механизм поступления радона – диффузионный, при отсутствии зависимости скорости поступления радона от  $\Delta T$ , или конвективный, соответствующий значительному росту скорости поступления радона с ростом  $\Delta T$ . При этом, вклад диффузионного механизма поступления радона в помещение может быть определен как отношение скорости поступления радона при нулевой разности температур  $\Delta T$  к скорости поступления радона при средней заданной разности температур  $\Delta T_{cp}$ :

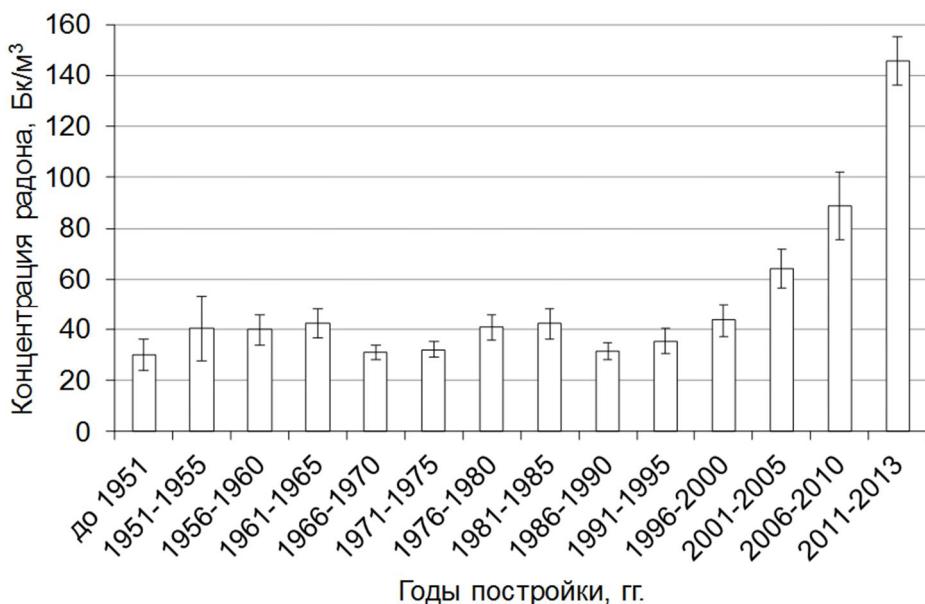
$$M, \% = \rho_0 \frac{S_0(0)}{S_0(\Delta T_{cp})} \cdot 100\%. \quad (8)$$

## 2. Результаты исследования и обсуждение

### 2.1. Радоновое обследование г. Екатеринбурга

На основании совместного анализа данных радонового обследования г. Екатеринбурга и результатов дополнительных измерений, проведенных в рамках настоящей работы, было установлено, что концентрации радона в помещениях современных зданий более чем в два раза превышают концентрации радона в зданиях, построенных до введения требований к энергосбережению.

На рисунке 1 приведена диаграмма, демонстрирующая зависимость концентрации радона в жилищах города Екатеринбурга от года постройки.



*Рисунок 1 – Зависимость концентраций радона в помещениях домов г. Екатеринбурга от года постройки дома (указаны средние значения и стандартные ошибки).*

Согласно полученным результатам, наблюдается значительный рост концентрации радона в помещениях современных зданий. Такая тенденция может привести к росту уровней облучения населения и увеличению заболеваемости и смертности от рака легкого в будущем.

## 2.2 Определение механизмов поступления радона и параметров воздухообмена

Исследование параметров поступления и стока радона было проведено в 12 помещениях различного назначения: в восьми квартирах многоэтажных зданий и четырех помещениях зданий офисного типа (табл. 1). Для проведения измерений был использован радон-монитор AlphaGUARD, позволяющий проводить непрерывные измерения концентрации радона, атмосферного давления и температуры в помещении.

В среднем период измерений составил 5-6 месяцев, включая летний и зимний сезоны. Никаких ограничений на эксплуатацию помещений не налагалось. Для каждого из помещений было проанализировано от 30 до 60 суточных кривых изменения концентрации радона, соответствующих различным разностям температур  $\Delta T$ .

Таблица 1 – Характеристики помещений и период измерений

№	Основной материал ограждающих и несущих конструкций, год постройки	Этаж измерения / этажность	Период измерения и количество зарегистрированных данных	Среднее значение концентрации радона, $\text{Бк}/\text{м}^3$
помещения офисного типа				
1	кирпич, 1970-е гг.	1/2	21.10.2004-23.06.2005 результатов - 5105	133
2	кирпич, 1950-е гг.	2/3	11.08.2010-29.12.2010 результатов - 3355	57
3	кирпич, 1950-е гг.	1/3	25.07.2012-23.12.2012 результатов - 3620	76
4	газобетонные блоки, после 2005	2/2	15.08.2012-14.01.2013 результатов - 3646	107
жилые помещения в многоквартирных домах				
5	кирпич, после 2000	1/5	08.01.2011-01.06.2011 результатов - 3438	62
6	монолит, 2007	17/25	27.06.2010 - 28.01.2011 результатов - 2237	193
7	монолит, газобетонные блоки, 2010	6/10	24.01.2012 - 14.08.2012 результатов - 4838	143
8	монолит, 2012	13/16	21.01.2013 - 24.07.2013 результатов - 4404	203
9	монолит, газобетонные блоки, 2012	3/16	11.01.2013 - 01.08.2013 результатов - 4842	173
10	монолит, 2007	3/24	01.07.2011 - 22.12.2011 результатов - 4164	120
11	монолит, 2003	7/10	22.06.2011 - 26.12.2011 результатов - 4477	48
12	монолит, 2002	4/16	28.02.2009 - 28.04.2009 результатов - 1426	50

Параметры накопления радона в обследованных помещениях, полученные на основании разработанного метода [5-7], приведены в таблице 2. Как можно видеть из таблицы 2, средний уровень КВО в стационарном режиме эксплуатации помещений  $\lambda_0$  (соответствующий закрытому помещению) составляет величину порядка  $0,2 \text{ ч}^{-1}$ , что хорошо согласуется с оценками, полученными на основании теоретического моделирования и экспериментальных исследований для закрытых помещений [14]. Также в работе [1] показано, что к снижению КВО до величин порядка  $0,2 \text{ ч}^{-1}$  приводит использование многослойных стеклопакетов и притворов с двойным уплотнением.

Таблица 2 – Параметры поступления и накопления радона в обследованных помещениях

№	Скор. поступ. $S_0 \pm \text{станд.ош.},$ Бк/м <sup>3</sup> ·ч <sup>-1</sup>	$\lambda_0 \pm \text{станд.ош.},$ ч <sup>-1</sup>	$\lambda_{\text{ср}} \pm \text{станд.ош.},$ ч <sup>-1</sup>	Вклад диффуз. поступления $\pm \text{станд.ош.}$	Ср. знач. кон-ции, Бк/м <sup>3</sup>
помещения офисного типа					
1	33±1	0,25±0,01	-	0,91±0,04	133
2	7±1	0,09±0,01	-	0,85±0,18	57
3	23±1	0,24±0,02	-	0,58±0,05	76
4	35±2	0,24±0,02	-	0,58±0,12	107
жилые помещения в многоквартирных домах					
5	15±1	0,17±0,01	-	0,33±0,08	62
6	42±3	0,22±0,01	0,32±0,06	0,64±0,08	193
7	33±1	0,16±0,01	0,40±0,05	0,92±0,03	143
8	38±2	0,09±0,01	0,26±0,03	0,75±0,08	203
9	63±4	0,20±0,02	0,52±0,05	0,59±0,09	173
10	38±2	0,20±0,02	0,35±0,03	0,86±0,07	120
11	21±1	0,16±0,01	-	0,65±0,08	48
12	18±1	0,23±0,01	-	-	50

Согласно полученным результатам, концентрации радона в современных зданиях (помещения 6-12, построенные после 2000 года) значительно превышают средние значения, полученные в помещениях зданий г. Екатеринбурга. Средний уровень концентрации радона в выборке (133 Бк/м<sup>3</sup>) более чем в три раза превышает средний уровень концентрации радона в зданиях города, построенных до введения требований к энергосберегающему строительству (38 Бк/м<sup>3</sup>). В этих помещениях получены максимальные значения скорости поступления радона. Основная часть поступлений обусловлена диффузионным механизмом.

Согласно результатам, полученным в работе [7], значение КВО существенно зависит от режима эксплуатации помещения. Среднее значение КВО в стационарном режиме эксплуатации по всем обследованным помещениям ниже 0,2 ч<sup>-1</sup>, при этом КВО в активном режиме эксплуатации достигает величин ~1,5 ч<sup>-1</sup> со средним по всей выборке 0,87 ч<sup>-1</sup>. Средние значения КВО  $\lambda_{\text{ср}}$  для помещений 6-10 хорошо согласуются с оценками, полученными при помощи моделирования воздухообмена в помещениях на основании воздухопроницаемости ограждающих конструкций [1]. Таким образом, для помещений современных многоэтажных зданий г. Екатеринбурга КВО в условиях реальной эксплуатации находится на достаточно низком уровне ~0,35 ч<sup>-1</sup>.

### **Выводы**

Уровень концентрации радона в помещениях современных зданий более чем в 2 раза превышает среднюю концентрацию радона в многоэтажных домах г. Екатеринбурга, построенных до введения требований к энергосберегающему строительству.

Одной из основных причин высоких концентраций радона в современных зданиях г. Екатеринбурга является низкая КВО. На практике жильцы не обеспечивают воздухообмен, необходимый с точки зрения санитарно-гигиенических норм. Значимость обеспечения требуемого воздухообмена подтверждается экспериментальными оценками [14], из которых вытекает, что в квартире с жилой площадью 100 м<sup>2</sup> при проживании в ней двух человек требуется кратность воздухообмена 0,35 ч<sup>-1</sup>, четырех человек – 0,55 ч<sup>-1</sup>, пяти человек – 1,0 ч<sup>-1</sup>. Причем эти КВО являются заниженными, так как не учитывают требуемый воздухообмен для удаления с приточным воздухом поступивших загрязняющих веществ и вредных выделений в помещения. Так, например, по санитарно-гигиеническим нормам Московской области КВО должна составлять от 0,5 до 1 ч<sup>-1</sup>.

При естественной вентиляции окна играют роль приточных устройств и при недостаточной инфильтрации вентиляция должна осуществляться через открытые форточки. Однако

невозможность отрегулировать положение створок вынуждает жильцов использовать их только для кратковременного проветривания помещений даже при ощущимой духоте в квартире. Учитывая, что для существующих многоэтажных городских жилищ в условиях доминирующего диффузионного механизма поступления радона единственным эффективным мероприятием по снижению повышенных концентраций радона является изменение режима вентиляции помещений, необходим пересмотр используемых методов обеспечения воздушного режима. Для тех помещений, где требуется снижение концентрации радона до приемлемых уровней, необходимый поток воздуха может быть рассчитан с применением разработанного метода оценки параметров воздухообмена [5-7]. Его использование позволяет уйти от использования трудоемких и неточных (в реальных условиях эксплуатации) способов оценки КВО при помощи экспериментов с аэродверью и индикаторными газами.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Milner J., Shrubsole C., Das P., Jones B., et al. Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study // BMJ. – 2014. – №348. – Р. 1-12.
2. Ярмошенко, И.В. Обследование уровней накопления радона в жилых зданиях города Екатеринбурга [Текст] / И.В. Ярмошенко, А.Д. Онищенко, М.В. Жуковский // Вопросы радиационной безопасности. – 2010. – №3(59). – С. 62-69.
3. Yarmoshenko I., Onishchenko A., Zhukovsky M. Establishing a regional reference indoor radon level on the basis of radon survey data // J Radiol Prot. – 2013. – №33. – Р. 329-338.
4. Николаев, В.А. Твердотельные трековые детекторы в радиационных исследованиях [Текст] / В.А. Николаев. – С-Пб.: Изд-во Политехнического университета, 2012. – 283 с.
5. Жуковский, М.В. Определение механизмов и параметров поступления радона в помещение [Текст] / М.В. Жуковский, А.В. Васильев // АНРИ. – 2012. – №1. – С. 5-14.
6. Vasilyev A.V., Zhukovsky M.V. Determination of mechanisms and parameters which affect radon entry into a room // J Environ Radioact. – 2013. – №124. – Р. 185-190.
7. Васильев, А.В. Изменение кратности воздухообмена как мера снижения облучения населения радоном в городских жилищах, построенных с использованием современных технологий [Текст] / А.В. Васильев, И.В. Ярмошенко, М.В. Жуковский // АНРИ. – 2014. – №3. – С. 2-10.
8. Крисюк, Э.М. Радиационный фон помещений [Текст] / Э.М. Крисюк. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 120 с.
9. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации [Текст]. Доклад НКДАР ООН за 1988 г. М.: Мир, 1992. – Т.1.
10. Gadgil A.J. Models of radon entry // Radiat Prot Dosim. 1992. – № 45. – Р. 373-379.
11. Arvela H. Residential Radon in Finland: Seasonal variation in radon concentrations of 3000 dwellings with model comparison // Radiat Prot Dosim. – 1995. – №59 (1). – Р. 33-42.
12. Sherman M.H. Simplified Modeling for Infiltration and Radon Entry / In: Proceedings, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings Conference V (addendum), Atlanta, GA: ASHRAE. 1992.
13. Sherman M.H., Modera M.P. Comparison of measured and predicted infiltration using the LBL infiltration model / Berkeley CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1984. LBL-17001.
14. Гигиенический комфорт жилища [Текст] / Обзорная информация, №9, ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре. – М.: Стройиздат, 1982. – 28 с.

**Васильев Алексей Владимирович**

Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург

Аспирант, радиационная лаборатория

Тел.: +7 (343) 362-34-21

E-mail: vav@ecko.uran.ru

---

A. VASILYEV

## **INDOOR RADON PROBLEM IN MODERN MULTI-STORY DWELLINGS**

*According to the results of the radon survey conducted in the city of Ekaterinburg (Russia), radon concentration in dwellings constructed with the use of energy efficient technologies exceeds the*

*longtime average level. Preponderance of the diffusion mechanism of radon entry in modern multi-story buildings has been experimentally established. Air exchange rate has to be considered as extremely low in energy efficient multi-story buildings.*

**Keywords:** radon, radon entry rate, ventilation rate.

## BIBLIOGRAPHY

1. Milner J., Shrubsole C., Das P., Jones B., et al. Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study // BMJ. – 2014. – №348. – P. 1-12.
2. Jarmoshenko, I.V. Obsledovanie urovnej nakoplenija radona v zhilyh zdaniyah goroda Ekaterinburga [Tekst] / I.V. Jarmoshenko, A.D. Onishhenko, M.V. Zhukovskij // Voprosy radiacionnoj bezopasnosti. – 2010. – №3(59). – S. 62-69.
3. Yarmoshenko I., Onishchenko A., Zhukovsky M. Establishing a regional reference indoor radon level on the basis of radon survey data // J Radiol Prot. – 2013. – №33. – P. 329-338.
4. Nikolaev, V.A. Tverdotel'nye trekovye detektory v radiacionnyh issledovanijah [Tekst] / V.A. Nikolaev. – S-Pb.: Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2012. – 283 s.
5. Zhukovskij, M.V. Opredelenie mehanizmov i parametrov postuplenija radona v pomeshhenie [Tekst] / M.V. Zhukovskij, A.V. Vasil'ev // ANRI. – 2012. – №1. – S. 5-14.
6. Vasilyev A.V., Zhukovsky M.V. Determination of mechanisms and parameters which affect radon entry into a room // J Environ Radioact. – 2013. – №124. – P. 185-190.
7. Vasil'ev, A.V. Izmenenie kratnosti vozduhoobmena kak mera snizhenija obluchenija naselenija radonom v gorodskih zhilishchah, postroennyh s ispol'zovaniem sovremennoj tehnologij [Tekst] / A.V. Vasil'ev, I.V. Jarmoshenko, M.V. Zhukovskij // ANRI. – 2014. – №3. – S. 2-10.
8. Krisjuk, Je.M. Radiacionnyj fon pomeshhenij [Tekst] / Je.M. Krisjuk. – M.: Jenergoatomizdat, 1989. – 120 c.
9. Istochniki, jeffekty i opasnost' ionizirujushhej radiacii [Tekst]. Doklad NKDAR OON za 1988 g. M.: Mir, 1992. – T.1.
10. Gadgil A.J. Models of radon entry // Radiat Prot Dosim. 1992. – №45. – P. 373-379.
11. Arvela H. Residential Radon in Finland: Seasonal variation in radon concentrations of 3000 dwellings with model comparison // Radiat Prot Dosim. – 1995. – №59 (1). – P. 33-42.
12. Sherman M.H. Simplified Modeling for Infiltration and Radon Entry / In: Proceedings, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings Conference V (addendum), Atlanta, GA: ASHRAE. 1992.
13. Sherman M.H., Modera M.P. Comparison of measured and predicted infiltration using the LBL infiltration model / Berkeley CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1984. LBL-17001.
14. Gigienicheskij komfort zhilishha [Tekst] / Obzornaja informacija, №9, CNTI po grazhdanskому stroitel'stvu i arhitekture. – M.: Strojizdat, 1982. – 28 s.

### A. Vasilyev

Institute of industrial ecology UB RAS, Ekaterinburg  
Postgraduate student, radiation laboratory  
Ph.: +7 (343) 362-34-21  
E-mail: vav@ecko.uran.ru

ИВАЩУК О.А., КВАНИН Д.А.

## **ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СФЕРЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ДВОРОВЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

*В статье анализируются современные проблемы, связанные с обеспечением экологической безопасности территорий быстроразвивающихся и, соответственно, быстро застраиваемых регионов. Исследуются подходы к построению интеллектуальной системы поддержки принятия решений как основы функционирования автоматизированной системы управления экологической безопасностью дворовых территорий (качественное состояние природной среды которых оказывает воздействие на здоровье и жизнедеятельность наиболее уязвимой части населения). Функции и структура моделируемой системы позволяют обеспечить оперативность, научную обоснованность и результативность управленческих решений, реальное изменение экологической ситуации.*

**Ключевые слова:** поддержка принятия решений, дворовые территории, экологическая безопасность, экологический мониторинг, прогнозирование, ситуационное моделирование.

Строительный комплекс сегодня является одной из важнейших и быстроразвивающихся сфер экономики России. Так, инвестиции в основной капитал организаций, осуществляющих строительную деятельность, составляют более 990 млрд. рублей в год, что почти в 6 раз превышает данный показатель в 2005 году. К 2013 году число действующих строительных организаций различных форм собственности в стране превысило 205 тыс. (в 1,6 раз больше, чем в 2000 году), при этом по ЦФО этот показатель составил более 57 тыс. или около 30%; объем работ, выполненных по виду экономической деятельности «Строительство» организациями различных форм собственности, составил только в ЦФО более 1400 млрд. рублей; введено в действие 65,7 млн. м<sup>2</sup> жилых домов, что в 2,1 раза больше, чем в 2000 году, при этом по ЦФО введено около 18,2 млн. м<sup>2</sup> или около 28% [1]. Вклад отдельных регионов по данным показателям продемонстрирован на рисунке 1.

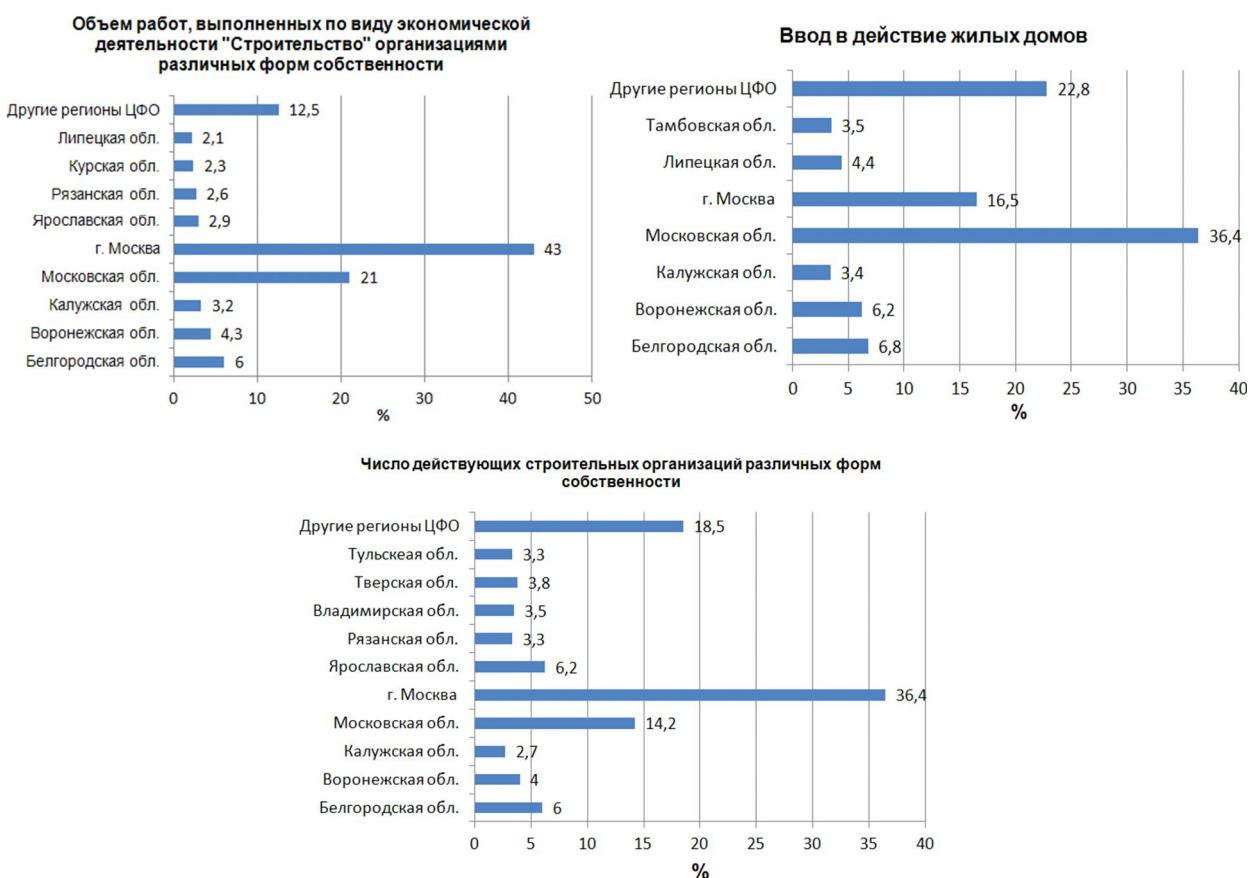
Следует отметить, что выполнение современных требований по инновационно-ориентированному устойчивому развитию сформированных в регионах России строительных и жилищно-коммунальных (ЖКХ) территориальных кластеров неотъемлемо связано с обеспечением высокого уровня их экологической безопасности: при производстве и использовании строительных материалов и конструкций, введение в эксплуатацию жилых и промышленных зданий и сооружений, организации инфраструктуры территории и др.

В Экологической доктрине РФ [2] в качестве одной из основных задач ставиться проведение реконструкции населенных пунктов и промышленных зон в целях создания на этой основе среды обитания, благоприятной для здоровья и жизнедеятельности человека.

На заседании с членами Совбеза РФ, состоявшемся в ноябре 2013 года, Президент В.В. Путин отметил, что «не менее 15% территории России находится в неудовлетворительном экологическом состоянии»; что отдельных отраслевых решений в сфере экологической безопасности, реализуемых сегодня в стране, явно недостаточно; что необходимо улучшить качество экспертизы, составлять научно обоснованные прогнозы для представления перспективы развития экологической ситуации [3].

В настоящее время различными экологическими и санитарно-эпидемиологическими службами проводится контроль состояния окружающей среды на территориях различного назначения. При этом повышение эффективности экологического мониторинга в основном связано с наращиванием числа наблюдательных станций, разработкой и внедрением новейшей аппаратуры, методов регистрации загрязнений и их источников. Однако даже на территориях, где функционируют автоматизированные системы экомониторинга с развитой сетью стационарных и мобильных станций контроля, оснащенные современными приборами, не наблюда-

ется принципиального улучшения экологической ситуации. Так, по данным Росгидромета [4], в 138 городах Российской Федерации, где проживает около 60% городского населения страны, уровень загрязнения одной из важнейших составляющих природной среды – атмосферного воздуха – характеризуется как высокий или очень высокий; соответствующие значения по ЦФО представлены в таблице 1. Как видно из таблицы, быстро развивающиеся и, соответственно, быстро застраиваемые регионы (см. рис. 1), сталкиваются с острой необходимостью решения проблемы улучшения качества природной среды и снижения экологических рисков.



*Рисунок 1 – Процентное соотношение вклада регионов ЦФО в значения показателей развития экономической сферы «Строительство» (на 01.01.2013 г.)*

Выделим две основные современные проблемы, связанные с проведением экологического мониторинга, которые, по мнению авторов, значительно снижают его результативность как основы управления экологической безопасностью контролируемой территории. Во-первых, существующие мониторинговые системы, реализуя сбор и первичную обработку данных, позволяя провести адекватную оценку качества отдельных компонентов природной среды, оценку мощности оказываемого негативного техногенного воздействия и выявить сами источники загрязнения, не формируют информацию уровня, пригодного для непосредственной ее трансформации в рациональные и эффективные управляющие воздействия.

Результат функционирования подобных систем – это составление отчетов, томов ПДВ, предоставление отчетной информации (в т.ч. визуализированной) заинтересованным лицам. Однако актуализация рациональных научно обоснованных управляющих воздействий, направленных на улучшение сложившейся экологической ситуации и предотвращение возникновения экологических рисков, сегодня должна основываться и на данных прогнозирования, а также ситуационного моделирования, которые будут использоваться как для формирования, так и для оценки и выбора различных сценариев управления. Подобными функциями существующие системы экомониторинга не наделены, или наделены фрагментарно.

Таблица 1 – Доля населения, проживающего в городах с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха по ЦФО (данные Росгидромета)

Субъект РФ (в ЦФО)	Количество		Население (%) в городах с высоким и очень высоким уровнем загрязняющих веществ
	городов	станций	
	с регулярными наблюдениями за загрязнением воздуха		
Белгородская обл.	3	10	22
Брянская обл.	1	4	48
Владимирская обл.	1	4	31
Воронежская обл.	1	6	64
Ивановская обл.	2	3	47
Калужская обл.	1	2	45
Костромская обл.	2	5	0
Курская обл.	1	5	55
Липецкая обл.	1	6	67
г. Москва	1	17	100
Московская обл.	10	20	7
Орловская обл.	1	4	60
Рязанская обл.	1	4	63
Смоленская обл.	1	3	0
Тамбовская обл.	1	4	0
Тверская обл.	1	1	40
Тульская обл.	3	10	50
Ярославская обл.	3	8	56

Во-вторых, в настоящее время существует серьезная проблема оценки и прогнозирования развития экологической ситуации, сложившейся на локальных территориях, где качественное состояние природной среды оказывает воздействие на здоровье и жизнедеятельность наиболее уязвимой части населения (дети, подростки, пожилые люди). Прежде всего, это городские дворовые территории. Существующие методические и программные средства не предназначены для решения данных задач. Инструментальная сеть регулярного экомониторинга не включает эти территории, оценка их состояния может проводиться только выборочно (при заказе такой услуги местными жителями или территориальной администрацией).

Авторами поставлена задача моделирования такой интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР),

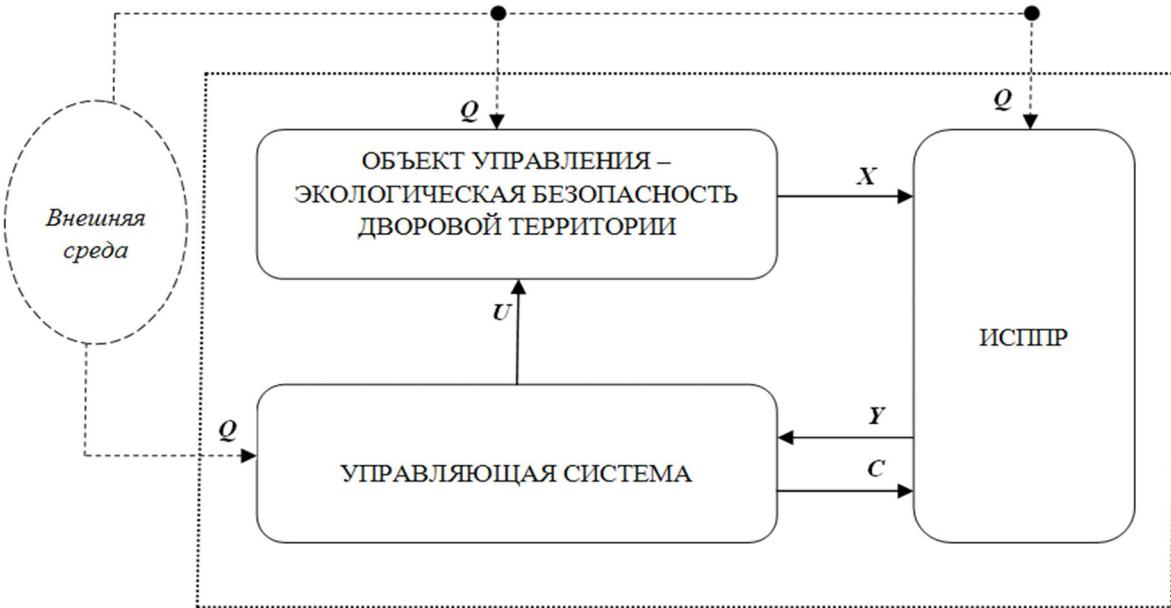
- которая будет являться одной из базовых частей автоматизированной системы управления экологической безопасностью (АСУ ЭБ) дворовых территорий;

- результат функционирования, которой сможет быть актуализирован для непосредственного формирования эффективных научно обоснованных управлеченческих решений (кратко-, средне- и долгосрочного характера) по снижению и предотвращению экологических рисков.

При решении поставленной задачи будем по аналогии пользоваться определением дворовой территории, данном в документе [5], в котором обозначено, что это территория, прилегающая к жилому зданию и находящаяся в общем пользовании проживающих в нем лиц, ограниченная по периметру жилыми зданиями, строениями, сооружениями или ограждениями. На дворовой территории в интересах лиц, проживающих в жилом здании, к которому она прилегает, размещаются детские площадки, места для отдыха, сушки белья, парковки автомобилей, зеленые насаждения и иные объекты общественного пользования.

Схематично обобщенная модель АСУ ЭБ дворовой территории представлена на рисунке 2. Параметры, представленные на схеме:  $X$  – параметры состояния объекта

управления АСУ, анализируемые в ИСППР;  $Y$  – результаты экомониторинга и интеллектуального анализа его данных, обеспечивающие поддержку принятия решений в АСУ;  $C$  – параметры обратной связи (информация о выбранных для реализации управляющих воздействий, изменения в нормативно-правовой базе, приборном, методическом и программном обеспечении);  $U$  – управляющие воздействия на объект управления;  $Q$  – параметры влияния внешней среды на подсистемы АСУ.



*Рисунок 2 – Схематичное представление обобщенной модели АСУ ЭБ дворовой территории*

В качестве основы авторами использована разработанная ранее модель АСУ ЭБ территорий [6], в которую внесены принципиальные изменения. Так, если в оригинальной модели система экологического мониторинга рассматривалась как одна из основных составляющих и самостоятельная подсистема, выполняющая функции сбора и первичной обработки данных (в т.ч. их предварительной оценки), то в предлагаемой модели она является неотъемлемой частью интеллектуальной подсистемы поддержки принятия решений. Ее функционирование связано не только со сбором данных, но и с обязательной их обработкой для трансформации в конкретные сценарии управления. Кроме того, данный компонент наделяется следующими интеллектуальными функциями:

- комплексная модельная оценка экологической ситуации, сложившейся в целом на дворовой территории;
- оперативный предварительный прогноз изменения характеристик качества окружающей среды без реализации управляющих воздействий.

Для их реализации необходимо регулярное снабжение подсистемы экомониторинга адекватными моделями оценки и прогнозирования, формируемыми непосредственно в ИСППР.

Исследуемая система – ИСППР – может быть представлена следующей теоретико-множественной формулой (кортежем):

$$S = \langle SS, X, Y, R, EI, F, O \rangle, \quad (1)$$

где  $SS = \{ss\}$  – множество основных компонентов, реализующих основные функции моделируемой ИСППР;  $X = \{x\}$  – множество входов системы;  $Y = \{y\}$  – множество выходов системы;  $R = \{r\}$  – множество состояний компонентов  $SS$ ;  $EI = \{ei\}$  – множество внешних воздействий на подсистемы (элементы) исследуемой системы;  $F = \{f\}$  – множество отображений на  $X, R, Y$  и  $EI$ ;  $F: (X, Y, R, EI) \rightarrow Y (\rightarrow R)$ ;  $O = \{o\}$  – множество отношений над элементами  $X, R, Y$  и  $EI$ ;  $O: (X^i, R^j, R^k, EI^l)$ . Множества и арности формируются в зависимости от конкретных условий

рассматриваемой территории, а также используемой в системе приборной, методической и программной базы.

Составляющие множества  $SS$  определяется, прежде всего, функциями, которыми наделена ИСППР, и которые обеспечивают реализацию ее главной функции: «*Поддержка принятия результативных научно обоснованных решений по управлению экологической ситуацией на дворовых территориях*». На рисунке 3 продемонстрировано соответствие между функциями, выявленными на основе анализа современных требований к процессу управления экологической безопасностью выбранных территорий и в результате декомпозиции главной функции моделируемой системы, и актуализирующими их подсистемами ИСППР. Таким образом,  $SS=\{SS_1, SS_2, SS_3, SS_4\}$ . Множество  $R$  в качестве компонентов содержит параметры состояния данных подсистем.



### *Рисунок 3 – Функции и реализующие их подсистемы ИСППР*

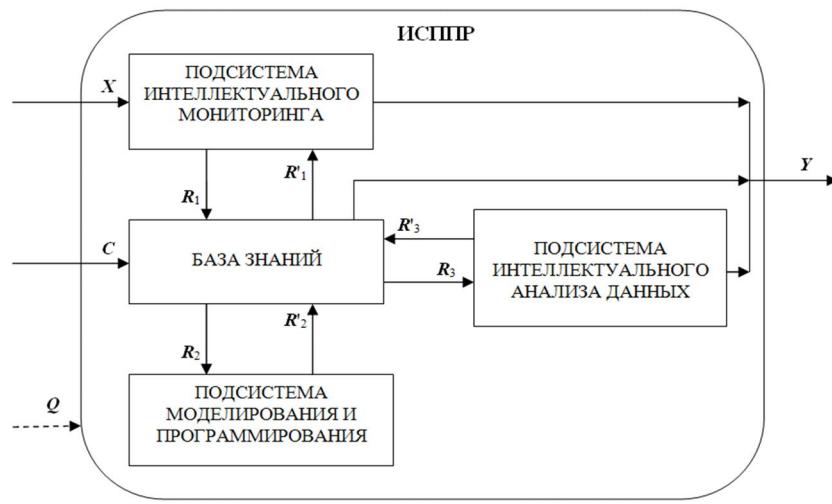
Входные параметры (подмножества  $X$ ), которые характеризуют состояние экологической безопасности на дворовой территории, можно разделить на следующие основные группы: информация о качестве компонентов природной среды ( $X_1$ ); информация об инфраструктуре территории ( $X_2$ ); информация о санитарном состоянии территории ( $X_3$ ); информация о погодно-климатических условиях ( $X_4$ ). В таблице 2 показана их конкретизация в соответствии с нормативно-правовыми документами.

Выходные параметры (составляющие множества  $Y$ ) – результаты оценки текущей экологической ситуации; результаты прогнозов развития экологической ситуации и возникновения экологических рисков; сценарии управления и их оценки. Они поступают в управляющую подсистему АСУ ЭБ для формирования управленческих решений и реализации конкретных управляющих воздействий.

**Таблица 2 – Параметры входной информации для ИСППР**

Группа параметров	Наименование параметра
Информация о качестве компонентов природной среды ( $X_1$ )	Загрязнение атмосферы
	Уровень шума
	Уровни вибрации, инфразвука
	Уровень электромагнитных полей
	Уровень ионизирующего излучения
Информация об инфраструктуре территории ( $X_2$ )	Озеленение территории
	Функциональное зонирование и размещение площадок
	Условия хранения автомобилей
	Автодороги жилой застройки
Информация о санитарном состоянии территории ( $X_3$ )	Расположение относительно территорий промышленно-коммунальных, санитарно-защитных зон предприятий, сооружений и др. объектов
	Инсоляция и освещенность
	Условия стока талых и ливневых вод
	Наличие предприятий торговли, питания, ремонта и др.
	Уборка территории
	Удаление бытовых отходов и мусора
Информация о погодно-климатических условиях ( $X_4$ )	«Роза ветров»
	Скорость и направление ветра
	Температура воздуха
	Влажность воздуха
	Атмосферное давление
	Осадки
	Сезонность
	Климатические особенности

Множество внешних воздействий  $EI$  состоит из двух основных подмножеств:  $EI = \{C, Q\}$ , где  $C$  – управляющая информация, а именно федеральные и региональные законы, нормативно-правовые документы (нормативные акты, технические регламенты, постановления правительства, государственный стандарты (ГОСТ), руководящие документы, гигиенические нормы, санитарные правила и нормы (СанПиН), строительные нормы и правила (СНИП), общесоюзные нормы технического проектирования (ОНТП)). Данный информационный поток поступает из управляющей системы АСУ ЭБ. Также составляющим данного множества являются запросы к базе знаний для получения необходимой информации (в том числе, ретроспективной). Множество  $Q$  представляет собой влияние внешней среды (общей для ИСППР и АСУ в целом). На рисунке 4 представлена структурная модель ИСППР, где  $R_1$  – обработанные данные подсистемы интеллектуального мониторинга (данные наблюдений и результаты оценок и предварительных прогнозов);  $R'_1$  – нормативные данные и модели, необходимые для проведения сравнительных оценок, комплексной оценки экологической ситуации и предварительного прогнозирования ее развития без управляющих воздействий;  $R_2$  – данные, а также методическое и программное обеспечение для проведения процесса математического, компьютерного и ситуационного моделирования, построения программ;  $R'_2$  – сформированные модели и программы, поступающие в хранилище моделей и программ;  $R_3$  – данные, модели, информация, необходимые для проведения интеллектуального анализа данных: прогнозирования (кратко-, средне- и долгосрочного) развития экологической ситуации при реализации различных вариантов управления, оценки этих вариантов, их результативности с точки зрения оперативности, эколого-экономической эффективности, устойчивости к внешним воздействиям; формирование и рекомендации по реализации сценариев управления;  $R'_3$  – поступающие для хранения и последующего использования результаты работы подсистемы интеллектуального анализа данных.



**Рисунок 4 – Структурная модель ИСППР**

Синтез ИСППР, включающей в качестве неотъемлемых составляющих и подсистему мониторинга (наделенную кроме традиционных интеллектуальными функциями), и подсистемы, реализующие интеллектуальный анализ данных, позволит обеспечить эффективное решение проблемы разобщенности данных мониторинга и процесса формирования и реализации управления. Данные наблюдений будут непосредственно трансформироваться в возможные сценарии управления с оценкой их результативности.

АСУ ЭБ дворовых территорий с подобной структурой необходима как составляющая общей интеллектуальной сети управления функциями города. Результаты ее работы необходимы, прежде всего, при строительстве жилой застройки, реконструкции имеющихся жилых комплексов, введении в действие новых жилых зданий, а также общественных и промышленных зданий вблизи дворовых территорий; а также при строительстве и реконструкции улично-дорожной сети.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Российский статистический ежегодник 2013: Стат. сб. [Текст] / М: Росстат, 2013. – 717 с.
2. Экологическая доктрина РФ: одобрена распор. Правительства РФ от 31 августа 2002 г. №1225-р; опубл. на сайте Министерства природных ресурсов и экологии РФ 16 января 2013: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=133908>. (Дата обращения: 10.06.2014).
3. Заседание Совета Безопасности Российской Федерации от 20.11.2013 г.: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.scrf.gov.ru/news/804.html>. (Дата обращения: 10.06.2014).
4. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2012 году»: опубл. на сайте Министерства природных ресурсов и экологии РФ 15 января 2014: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ecogosdoklad.ru/default.aspx>. (Дата обращения: 10.06.2014).
5. Об обеспечении чистоты и порядка на территории Московской области: Закон Московской обл. от 29 ноября 2005 года N 249/2005-ОЗ (с изменениями на 23.12.2013); принят постановлением Московской обл. Думы от 16.11.2005, № 5/158-П. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.garant.ru/hotlaw/mos\\_obl/128959/](http://www.garant.ru/hotlaw/mos_obl/128959/) (Дата обращения: 10.06.2014).
6. Иващук, О.А. Подходы к созданию автоматизированной системы управления экологической безопасностью урбанизированных территорий [Текст] / О.А. Иващук, И.С. Константинов // Проблемы региональной экологии, 2013. – № 4. – С. 196-202.

**Иващук Ольга Александровна**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы управления»  
E-mail: olga.ivashuk@mail.ru

**Кванин Денис Александрович**

Орловский государственный аграрный университет, г. Орел  
Аспирант

## **SUPPORT DECISION-MAKING IN ENVIRONMENTAL CONTROL ON THE DOMESTIC TERRITORIES**

*The article analyzes the current problems associated with environmental safety and emerging areas, respectively, quickly built-up areas. The approaches to building intelligent decision support system as the basis of the automated control system of ecological safety of courtyard territories (qualitative state of the environment that have an impact on the health and livelihoods of the most vulnerable part of the population) are Investigated. The function and structure of the system will ensure efficiency, effectiveness and scientific validity of administrative decisions, the real change of the environmental situation.*

**Keywords:** decision support, domestic territories, environmental safety, environmental monitoring and forecasting, situational modeling.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Rossijskij statisticheskij ezhegodnik 2013: Stat. sb. [Tekst] / M: Rosstat, 2013. – 717 s.
2. Jekologicheskaja doktrina RF: odobrena raspor. Pravitel'stva RF ot 31 avgusta 2002 g. №1225-r; opubl. na sajte Ministerstva prirodnih resursov i jekologii RF 16 janvarja 2013: [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=133908>. (Data obrashhenija: 10.06.2014).
3. Zasedanie Soveta Bezopasnosti Rossijskoj Federacii ot 20.11.2013 g.: [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.scrf.gov.ru/news/804.html>. (Data obrashhenija: 10.06.2014).
4. Gosudarstvennyj doklad «O sostojanii i ohrane okruzhajushhej sredy Rossijskoj Federacii v 2012 godu»: opubl. na sajte Ministerstva prirodnih resursov i jekologii RF 15 janvarja 2014: [Jelektronnyj resurs]. URL: <http://www.ecogosdoklad.ru/default.aspx>. (Data obrashhenija: 10.06.2014).
5. Ob obespechenii chistoty i porjadka na territorii Moskovskoj oblasti: Zakon Moskovskoj obl. ot 29 nojabrja 2005 goda N 249/2005-OZ (s izmenenijami na 23.12.2013); prinят postanovleniem Moskovskoj obl. Dumy ot 16.11.2005, № 5/158-P. [Jelektronnyj resurs]. URL: [http://www.garant.ru/hotlaw/mos\\_obl/128959/](http://www.garant.ru/hotlaw/mos_obl/128959/) (Data obrashhenija: 10.06.2014).
6. Ivashhuk, O.A. Podhody k sozdaniyu avtomatizirovannoj sistemy upravlenija jekologicheskoy bezopasnost'ju urbanizirovannyh territorij [Tekst] / O.A. Ivashhuk, I.S. Konstantinov // Problemy regional'noj jekologii, 2013. – № 4. – S. 196-202.

**O. Ivashchuk**

Belgorod state national research university, Belgorod

Doctor of technical sciences, professor of the department «Information systems management»

E-mail: olga.ivashuk@mail.ru

**D. Kvanin**

Orel state agrarian university, Orel

Post graduate student

УДК 625.7:851

ИЛИОПОЛОВ С.К., ЛЕКОНЦЕВ Е.В., ЧЕРНОВ С.А., КАКЛЮГИН А.В.

### **МОДИФИЦИРОВАННАЯ ВИБРОЛИТАЯ АСФАЛЬТОБЕТОННАЯ СМЕСЬ С ПОВЫШЕННОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНОМУ СТАРЕНИЮ**

*В работе приводятся результаты проведенных исследований по замедлению процессов термоокислительного старения горячей вибролитой асфальтобетонной смеси, приготовленной с использованием эффективного комплексного модификатора, как при кратковременном ( $K_S$ ), так и при долговременном ( $K_L$ ) старении. Модификатор представлен термоэластопластом РТЭП, резиновой крошкой и адгезивом «Азол 1003». Показано, что наиболее эффективное содержание РТЭП в составе асфальтобетона от массы смеси составляет 0,3%, резиновой крошки – 0,9-1,1%, адгезива «Азол» 0,3-0,5%. В этом случае коэффициенты  $K_S$  и  $K_L$  значительно понижаются, что указывает на замедление процессов старения асфальтобетона как при приготовлении смеси, так и при укладке, уплотнении и эксплуатации покрытия.*

**Ключевые слова:** резиновая крошка, термоэластопласт, вибролитая асфальтобетонная смесь, термоокислительное старение, адгезионная добавка.

Одним из самых сложных условий применения для дорожного строительства вибролитых асфальтобетонных смесей являются высокие температуры их приготовления 220-240°C, а также укладки и уплотнения в пределах 180-200°C. Такие достаточно повышенные температуры вызывают процесс старения асфальтобетона, который существенным образом влияет на его структурно-механические и реологические свойства: упрочняется структура, он становится более жестким, хрупким и одновременно приобретает повышенную прочность [1, 2]. Это приводит к опасности образования трещин на асфальтобетонных покрытиях. Кроме этого, процесс старения вызывает уменьшение адгезии вяжущего к минеральному материалу, тем самым понижает их устойчивость к воздействию воды и температурных условий.

При старении асфальтобетона можно выделить четыре основных стадии процесса старения: упрочнение структуры, ее стабилизация, начало развития деструкционных процессов и разрушение. Длительность каждой стадии определяется многими факторами: технологией приготовления смесей и ее параметрами, происхождением, свойствами и зерновым составом минеральных материалов, характером взаимодействия вяжущего с поверхностью минеральных материалов, режимом технологии уплотнения смесей, интенсивностью движения транспортных средств и степенью их удельного давления на покрытие, климатическими условиями региона и др.

Первая стадия старения асфальтобетона характеризуется его упрочнением, повышением водостойкости, которые происходят под действием уплотняющих нагрузок от транспортных средств, а также под воздействием погодно-климатических факторов и процессов взаимодействия битума с минеральными материалами (перераспределением активных соединений битума в объеме битумных пленок по их толщине с повышением концентрации высокомолекулярных соединений – асфальтенов на границе с минеральной поверхностью), вызывающих уменьшение количества масел и увеличение количества смол и асфальтенов в асфальтобетоне, а также повышение когезии битума.

Вторая стадия старения наиболее продолжительная и характеризуется практической неизменностью показателей прочности асфальтобетона. Однако водо- и морозостойкость этого материала на второй стадии старения снижаются.

Третья и четвертая стадии старения характеризуются резким снижением прочности асфальтобетона, ростом его водонасыщения, уменьшением водо- и морозостойкости, которые могут привести к быстрому разрушению дорожного покрытия. При этом четкой границы между третьей и четвертой стадиями не существует [3, 4].

В настоящей работе приводятся результаты проведенных исследований по замедлению процессов термоокислительного старения горячей вибролитой асфальтобетонной смеси для ремонта и строительства дорожных покрытий, приготовленной с использованием эффективного комплексного модификатора.

Для приготовления вибролитого асфальтобетона в экспериментальном исследовании в качестве вяжущего материала использовался битум марки БНД 60/90, модифицированный добавкой из дисперсно-армированного термоэластопласта РТЭП, резиновой крошки и адгезионной добавки «Азол 1003». Содержание РТЭП в составе асфальтобетона составляло от 0,2 до 0,4% с шагом 0,1%, количество резиновой крошки варьировалось в интервале от 1,1 до 1,3% с шагом 0,1 % и адгезива «Азол 1003» – от 0,3 до 0,5% с шагом 0,1%. Такое соотношение вводимых добавок, как показали результаты предварительных исследований, является наиболее оптимальным. Подобранный зерновой состав вибролитой смеси соответствовал требованиям ГОСТ Р 54401-2011 к асфальтобетонным дорожным литым смесям II типа с максимальным размером зерен минерального материала не более 15 мм (табл. 1).

**Таблица 1 – Зерновой состав применяемых материалов и подобранный состав минеральной части вибролитой смеси**

Материалы	Содержание материала	Размер зерен, мельче, мм.								
		15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
Применяемые материалы										
Щебень гранитный фр. 5-10 мм	100	100	93,70	12,90	0,60	0,55	4,53	3,89	3,71	1,96
Песок из отсевов дробления гранита	100	100	95,50	81,40	61,70	45,30	29,80	19,90	9,50	2,80
Минеральный порошок (актив)	100	100	100	100	100	100	99,85	99,05	94,13	80,1
Состав смеси										
Щебень гранитный фр. 5-10 мм	8	8,00	8,54	1,30	0,70	0,50	0,34	0,31	0,30	0,16
Песок из отсевов дробления гранита	68	68,00	65,21	55,35	41,95	29,24	20,26	13,54	6,48	1,90
Минеральный порошок (актив)	24	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	23,77	23,50	19,22
	100									
Фактический зерновой состав	100	100,00	97,75	80,65	66,65	53.74	44.60	37,62	30.28	21.28
Требования ГОСТ Р 54401-2011 к литой асфальтобетонной смеси II типа	100	98-100	87-100	70-85	54-71	44-62	36-54	31-45	26-37	20-32

Используемый в работе термоэластопласт РТЭП разработан в ДорТрансНИИ РГСУ и выпускается научно-производственным предприятием ООО «ДорНИИ» в соответствии с ТУ 5718-001-7925941-2006. В его состав входят полиолефиновый модификатор, дробленая шинная резиновая крошка, битумное вяжущее и антиоксиданты. Модификатор представляет собой гранулы темно-коричневого цвета диаметром около 3-4 мм, получаемые путем совместной экструзии битума с перечисленными выше компонентами с последующей грануляцией. Физико-механические показатели РТЭП приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-механические показатели резиносодержащего термоэластопласта РТЭП

Наименование показателей	Норма	Значение показателя
1. Цвет	черный	черный
2. Температура размягчения добавки, °С	Не выше 140	132
3. Увеличение температуры размягчения битума БНД 60/90 с 5-процентным содержанием добавки, %	Не менее 15	17
4. Эластичность битума с 5-процентным содержанием добавки при температуре 25 °С. %	Не менее 40	56

Полиолефиновый компонент (вторичный полиэтилен) представляет собой агломерат серого цвета, получаемый из использованной упаковочной тары.

Резиновая крошка приготавливается дроблением резиновых изделий, например, автомобильных изношенных шин и камер, имеет вид темного порошка. В работе использовалась крошка с размером зерен менее 1,00 мм, отвечающая требованиям ТУ 38.108035-87 «Резина дробленая марок РД, РДС и РДЕ». В ее состав входят антиоксиданты и антистарители, вследствие чего вибролитой асфальтобетон, модифицированный с использованием раздробленной резиновой крошки, должен быть более устойчив к окислительному воздействию кислорода воздуха, обеспечивая получение устойчивой к старению смеси.

Адгезионная добавка «Азол-1003» является высокоэффективной жидкой композицией из продуктов лесохимических производств и фосфатидов растительных масел. Относится к малоопасным веществам 4-го класса опасности по ГОСТ 12.1007. Использование в работе адгезионной поверхности-активной добавки катионного типа «Азол-1003» позволяет повысить водоустойчивость разрабатываемой смеси, обеспечивая сцепление битума с кислым иультракислым гранитным щебнем, используемым в настоящей работе. Вяжущее с использованием адгезионной добавки «Азол-1003» приобретает более высокие адгезионные свойства за счет наличия в нем активных химических групп, увеличивающих полярность асфальтенов, стабилизируя его гетерогенную структуру, снижая тем самым процесс старения асфальтобетона. Выпускается адгезив ОАО «Котласский химический завод».

Разработанная композиция модифицированного вяжущего из перечисленных выше компонентов характеризуется наличием значительного количества ненасыщенных связей, свойственных резино-полиолефиновым соединениям. За счет потенциала этих связей происходит активное взаимодействие полиолефинового компонента модификатора со структурообразующими битумными частицами, главным образом, асфальтенами ароматических соединений с изменением коллоидной структуры вяжущего. Такая структура обеспечивает высокую деформативность вяжущего в наиболее опасный для асфальтобетонных покрытий зимне-весенний период. Использование в составе асфальтобетонной смеси резино-полиолефиновых добавок способствует росту показателя растяжимости вяжущего при 0°С и улучшению его свойств при низких зимних температурах, в то же время способствуя повышению вязкости вяжущего в летний жаркий период эксплуатации покрытия. Улучшение свойств битумов можно объяснить и тем, что, оставаясь частично захваченными полиолефиновыми блоками, частицы резиновой крошки образуют при остывании вяжущего единую эластичную резино-асфальтено-полиолефиновую решетку. Такая структура способствует приобретению вяжущим более высокой деформативности и повышенной вязкости. Асфальтобетонные смеси, содержащие модификатор РТЭП в сочетании с дополнительным количеством резиновой крошки и введением новой отечественной поверхности-активной добавкой «Азол-1003», как показали настоящие исследования, приобретают большую сдвигово-, трещино- и коррозионную устойчивость в целом со значительным замедленным процессом старения. Разработанная вибролитая асфальтобетонная смесь обладает низким водонасыщением, повышенной прочностью при 20 и 50°С, замедленным процессом старения и другими полезными эксплуатационными свойствами.

Для исследования процессов старения в работе использована подобранная смесь, составы и результаты испытаний которой представлены в таблице 3.

**Таблица 3 – Физико-механические показатели разработанных вибролитых асфальтобетонных смесей**

Состав	Битум БНД 60/90	Резиновая крошка	РГЭП	ПАВ «Азот»	Водонасыщение, %	Прочность, МПа			Глубина вдавливания штампа, мм	Сдвигустойчивость, МПа		Плотность, г/см <sup>3</sup>	Остаточная пористость, %	Пористость минерального остова, %	
						нарастание при 0°C	на скатие при 50 °C	на скатие при 20 °C		Коэффициент внутреннего трения	Коэффициент сцепления				
Разработанная смесь состав №1	7,9	1,1	0,20	0,50	0,40	4,8	1,55	4,33	2,5	28	0,91	0,30	2,33	1,90	20,70
Разработанная смесь состав №2	8,1	1,2	0,30	0,45	0,30	4,3	1,46	3,50	3,6	35	0,89	0,33	2,35	1,82	20,3
Разработанная смесь состав №3	8,3	1,3	0,40	0,35	0,25	3,7	1,35	3,22	2,2	39	0,87	0,38	2,38	1,75	20,0
Требования ГОСТ Р 54401-2011	-	-	-	-	не более 0,50	2,0-6,0	не норм	не норм	1,0-3,5 (4,0)	не норм	не норм	не норм	-	2,0	22

Оценка старения асфальтобетонов с использованием рассмотренного модификатора осуществлялась согласно программе SHRP в США, которая позволяет моделировать в лабораторных условиях процессы, происходящие при его производстве и эксплуатации. Согласно программе SHRP [5], выделяется два этапа старения асфальтобетона:

- технологический, который происходит во время приготовления, укладки и уплотнения асфальтобетонной смеси, сопровождается испарением легких углеводородов из битума, получив название кратковременного старения Short-Term Oven Aging (STOA);
- долговременное старение происходит в процессе эксплуатации асфальтобетонных покрытий и связано с влиянием погодно-климатических факторов на структуру асфальтобетона, получив название Long-Term Oven Aging (LTOA).

В настоящей работе исследование процессов старения разработанных модифицированных вибролитых асфальтобетонных смесей проведено по описанной в программе SHRP методике:

- при кратковременном старении (STOA) – асфальтобетонные смеси после ее приготовления выдерживали в течение 6 часов при температуре 135°C в термическом шкафу с циркуляцией воздуха, после чего из нее приготавляли цилиндрические образцы диаметром 10,1 см высотой 6,5 см для проведения исследований;

- при долговременном старении (LTOA) – асфальтобетонные образцы выдерживали в термическом шкафу с циркуляцией воздуха при температуре 85°C в течение 3 дней.

В исследовании приготовленные образцы асфальтобетонных смесей сравнивались с контрольными образцами, не подвергаемые влиянию процесса старения.

В качестве критерия оценки влияния старения на свойства асфальтобетона применялись показатели кратковременного старения  $K_S$  и долговременного старения  $K_L$ , которые рассчитывались по формулам:

$$K_S = \frac{S_{\text{STOA}}^{\text{после старения}}}{S_{\text{до старения}}} \times 100 \% ; K_L = \frac{S_{\text{LTOA}}^{\text{после старения}}}{S_{\text{до старения}}} \times 100 \% .$$

$S_{\text{STOA}}$  – устойчивость асфальтобетона по Маршалу при 60°C после кратковременного старения, кН;

$S_{\text{LTOA}}$  – устойчивость асфальтобетона по Маршалу при 60°C после долговременного старения, кН;

$S_{\text{до старения}}$  – устойчивость асфальтобетона по Маршалу при 60°C до старения, кН.

Коэффициенты старения вибролитого асфальтобетона полученные в результате кратко-временного и долговременного старения представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Коэффициенты влияния процесса старения STOA

Вибролитой асфальтобетон			
Состав	Содержание резиновой крошки, %		
	0,9	1,1	1,3
Вибролитой а/бетон без добавки	126,05	110,92	102,50
Вибролитой а/бетон + 0,2 % РТЭП	111,30	100,64	84,00
Вибролитой а/бетон + 0,3 % РТЭП	109,15	99,59	81,95
Вибролитой а/бетон + 0,4 % РТЭП	104,94	99,28	78,06

Таблица 5 – Коэффициенты влияния процесса старения LTOA

Вибролитой асфальтобетон			
Состав	Содержание резиновой крошки, %		
	0,9	1,1	1,3
Вибролитой а/бетон без добавки	134,03	108,72	82,35
Вибролитой а/бетон + 0,2% РТЭП	105,55	102,95	59,36
Вибролитой а/бетон + 0,3% РТЭП	103,00	100,09	53,83
Вибролитой а/бетон + 0,4% РТЭП	99,40	93,76	52,93

Анализ полученных зависимостей показывает, что использование добавки РТЭП и резиновой крошки в сочетании с адгезивом «Азол 1003» замедляет процесс старения асфальтобетона как при кратковременном, так и при долговременном старении. Исследованием установлено, что добавки РТЭП и резиновая крошка проявляют синергизм действий в замедлении старения смеси. Показано, что наиболее эффективное содержание РТЭП в составе асфальтобетона составляет 0,3%, а резиновой крошки – 0,9-1,1% от массы смеси. В этом случае коэффициенты  $K_S$  и  $K_L$  поникаются, что указывает на замедление процесса старения асфальтобетона как при приготовлении смеси, так и при эксплуатации. Дальнейшее увеличение содержания этих добавок менее заметно замедляет процесс старения асфальтобетона

## **Выводы**

Проведенным экспериментом выявлено положительное влияние применения добавки РТЭП и резиновой крошки на кинетику роста устойчивости асфальтобетона при термоокислительном воздействии на него, что крайне важно, поскольку работа с модифицированным вибролитым асфальтобетоном связана с более высокими температурами.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Мелик-Багдасаров, М.С. Исследование жесткого литого асфальтового бетона с целью применения в покрытиях городских дорог: дисс. канд. техн. наук. – СоюзДорНИИ, 1975.
2. Мелик-Багдасаров, М.С., Строительство и ремонт дорожных асфальтобетонных покрытий [Текст] / М.С. Мелик-Багдасаров, К.А. Гноев, Н.А. Мелик-Багдасарова. – Белгород, 2007. – 158 с.
3. Котляровский, Э.В. Строительно-технические свойства дорожных асфальтобетонов [Текст] / Э.В. Котляровский. – М., 2004.
4. Котляровский, Э.В. Долговечность дорожных асфальтобетонных покрытий и факторы, способствующие разрушению структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации [Текст] / Э.В. Котляровский, О.А. Воейко. – М., 2007.
5. Bell A.C., A.B. Wahaby Y, Cristime M.E., Sosnovske D, Selection of laboratory Aging procedures for asphalt aggregate mixtures. Strategic Highway Research Program. Report Nr SHRP – A – 383. National Research Council, Washington D.C. 183 p.

6. Мардирисова, И.В., Асфальтовое вяжущее для вибролитых асфальтобетонных смесей с повышенной стойкостью к процессам старения [Текст] / И.В. Мардирисова, Е.В. Леконцев, А.В. Каклюгин // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. Автомобильные дороги и аэродромы. – 2013. Вып. 6.

**Илиополов Сергей Константинович**

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильные дороги»  
E-mail: dortransnii@mail.ru

**Леконцев Евгений Валерьевич**

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Кандидат технических наук  
E-mail: evgenyi1987@me.com

**Чернов Сергей Анатольевич**

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры «Автомобильные дороги»  
E-mail: sergey\_a\_chernov@rambler.ru

**Каклюгин Александр Викторович**

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы»  
E-mail: kaklugin@gmail.com

---

S. ILOPOLOV, E. LEKONTSEV, S. CHERNOV, A. KAKLUGIN

### MODIFIED VIBROCASTING ASPHALT CONCRETE MIXTURE WITH A HIGHER RESISTANCE TO OXIDATIVE AGING

*The paper presents the results of studies on the slow process of thermal-oxidative aging of hot vibrable asphaltenes mixture prepared using the effective complex modifier, as in the short-term (KS) and long-term (KL) aging. The modifier represented by the thermoplastic elastomer STEP, rubber crumb and adhesive azole 1003". It is shown that the most effective contents STEP in the composition of the asphalt by weight of a mixture of 0,3% rubber crumb – 0,9-1,1%, adhesive "azole" 0,3-0,5%. In this case, the coefficients KS and KL significantly reduced, indicating a slowing of the aging process of asphalt concrete, as in the preparation of the mixture, and at packing, sealing and coating.*

**Keywords:** crumb rubber, thermoplastic rubber, vibrocasting mixture, thermo-oxidative aging, adhesive additive.

### BIBLIOGRAPHY

1. Melik-Bagdasarov, M.S. Issledovanie zhestkogo litogo asfal'tovogo betona s cel'ju primenenija v pokrytijah gorodskih dorog: diss. kand. tehn. nauk. – SojuzDorNII, 1975.
2. Melik-Bagdasarov, M.S., Stroitel'sto i remont dorozhnyh asfal'tobetonnyh pokrytij [Tekst] / M.S. Melik-Bagdasarov, K.A. Gnoev, N.A. Melik-Bagdasarova. – Belgorod., 2007. – 158 s.
3. Kotljarovskij, Je.V. Stroitel'no-tehnicheskie svojstva dorozhnyh asfal'tobetonov [Tekst] / Je.V. Kotljarovskij. – M., 2004.
4. Kotljarovskij, Je.V. Dolgovechnost' dorozhnyh asfal'tobetonnyh pokrytij i faktory, sposobstvujushchie razrusheniju struktury asfal'tobetona v processe jeksploatacii [Tekst] / Je.V. Kotljarovskij, O.A. Voejko. – M., 2007.
5. Bell A.C., A.B. Wahaby Y, Cristime M.E., Sosnovske D, Selection of laboratory Aging procedures for asphalt aggregate mitures. Strategic Highway Research Program. Report Nr SHRP – A – 383. National Research Council, Washington D.C. 183 p.

6. Mardirosova, I.V., Asfal'tovoe vjazhushhee dlja vibrolityh asfal'tobetonnyh smesej s povyshennoj stojkost'ju k processam stareniya [Tekst] / I.V. Mardirosova, E.V. Lekoncev, A.V. Kaklugin // Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. Avtomobil'nye dorogi i aviodromy. – 2013. Vyp. 6.

**S. Iliopolov**

Rostov state building university, Rostov-on-don  
Doctor of technical sciences, professor of the department «Roadways»  
E-mail: dortransnii@mail.ru

**E. Lekomtsev**

Rostov state building university, Rostov-on-don  
Candidate of technical sciences  
E-mail: evgenyi1987@me.com

**S. Chernov**

Rostov state building university, Rostov-on-don  
Candidate of technical Sciences, senior lecturer of the department «Roadways»  
E-mail: sergey\_a\_chernov@rambler.ru

**A. Kalugin**

Rostov state building university, Rostov-on-don  
Candidate of technical sciences, senior lecturer of the department «Building materials»  
E-mail: kaklugin@gmail.com

ПОДГОРНОВ Н.И., КОРОТЕЕВ Д.Д.

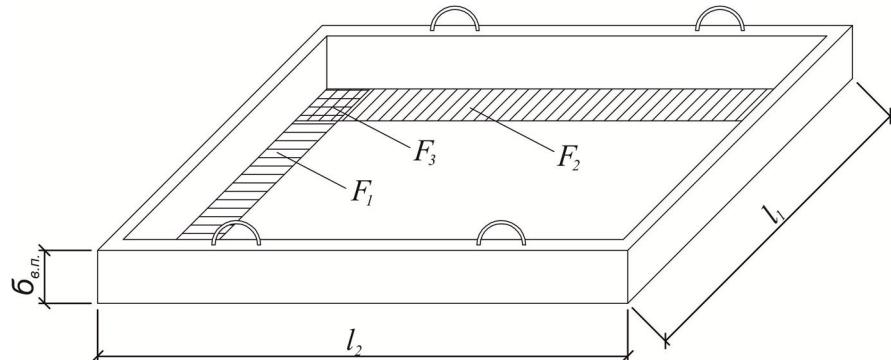
## ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ВОЗДУШНОЙ ПРОСЛОЙКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕТОНА ПРИ ТВЕРДЕНИИ В ОПАЛУБОЧНЫХ ФОРМАХ С ПРОЗРАЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ

*Приведены результаты исследований влияния толщины воздушной прослойки между прозрачным покрытием и бетоном на энергетическую эффективность его термообработки в опалубочных формах с использованием солнечной энергии в различных климатических условиях. На основе теплофизических расчетов и экспериментальных исследований выявлены оптимальные значения толщины воздушной прослойки между железобетонным изделием и прозрачным покрытием. Приведены допустимые значения толщины воздушной прослойки в зависимости от конструкции опалубочных форм.*

**Ключевые слова:** термообработка бетона, солнечная энергия, опалубочная форма, воздушная прослойка, прозрачное покрытие, энергетическая эффективность.

При тепловой обработке железобетонных изделий с использованием солнечной энергии в опалубочных формах с прозрачным покрытием толщина воздушной прослойки между покрытием и изделием является одним из конструктивных параметров, оказывающих влияние на формирование температуры бетона.

Увеличение толщины воздушной прослойки приводит к большему затенению солнцевоспринимающей поверхности железобетонного изделия, соответственно, к снижению поглощения солнечного излучения бетоном (рис. 1).



*Рисунок 1 – Схема затенения солнцевоспринимающей поверхности железобетонного изделия*

Влияние затенения учитывается введением коэффициента затенения, который равен:

$$\kappa_m = 1 - \frac{F_1 + F_2 - F_3}{l_1 \cdot l_2}, \quad (1)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – длина и ширина опалубочной формы, м;

$F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$  – площади затенения, которые определяются по формулам:

$$F_1 = \delta_{v,n} \cdot l_1 \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \sin A; \quad (2)$$

$$F_2 = \delta_{v,n} \cdot l_2 \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot \cos A; \quad (3)$$

$$F_3 = \delta_{v,n}^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \theta \cdot \sin A \cdot \cos A, \quad (4)$$

где  $\delta_{v,n}$  – толщина воздушной прослойки, м;  $\theta$  – угол падения прямой солнечной радиации;  $A$  – азимут Солнца.

С увеличением толщины воздушной прослойки уменьшается значение конвективного коэффициента тепловых потерь через прозрачное покрытие (5), соответственно, снижаются тепловые потери в окружающую среду.

$$h_{\kappa}^{\delta-n} = \frac{Nu \cdot \lambda_e}{\delta_{e,n}}, \quad (5)$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $\lambda_e$  – коэффициент теплопроводности воздуха,  $\text{Вт}/(\text{°C} \cdot \text{м}^2)$ .

Таким образом, толщина воздушной прослойки, при которой достигается баланс между минимальным значением конвективного коэффициента теплообмена и минимальным влиянием затенения на поглощение солнечного излучения поверхностью бетона является оптимальной.

Для определения оптимальной толщины воздушной прослойки выполнены расчеты и проведены экспериментальные исследования по определению температуры бетона, твердеющего в опалубочных формах с прозрачным покрытием в различных климатических условиях. Исследования проведены на бетонных образцах  $20 \times 20 \times 20$  ( $h$ ) см. Подробное описание исходных данных и методики проведения теоретических и экспериментальных исследований изложено в работах [1, 2, 3].

В таблице 1 и на рисунке 2 представлены результаты расчета распределения температуры в бетоне, твердеющем при  $\delta_{e,n}=10; 20; 40; 80$  мм в климатических условиях  $56^\circ$  с.ш. (июль). В таблице 2 и на рисунке 3 представлены результаты расчета распределения температуры в бетоне, твердеющем при  $\delta_{e,n}=5; 15; 30; 60$  мм в климатических условиях  $44^\circ$  с.ш. в середине июля.

**Таблица 1 – Результаты расчета температуры в середине бетонного образца, твердеющего при разной толщине воздушной прослойки  $\delta_{e,n}$  в опалубочной форме с прозрачным покрытием в климатических условиях  $56^\circ$  с.ш., июль**

Время, ч	$\kappa_m$ при $\delta_{e,n}$ , мм				$Q_{погл}$ [кДж] при $\delta_{e,n}$ , мм				$h_{\kappa}^{\delta-n}$ [ $\text{Вт}/(\text{°C} \cdot \text{м}^2)$ ] при $\delta_{e,n}$ , мм				$Q_{ном}$ [кДж] при $\delta_{e,n}$ , мм				$t_0$ [ $^{\circ}\text{C}$ ] при $\delta_{e,n}$ , мм			
	10	20	40	80	10	20	40	80	10	20	40	80	10	20	40	80	10	20	40	80
10-11	0,92	0,84	0,69	0,62	36,7	34,3	22,9	7	0	0	0	0	7,5	7,4	7,4	7,2	21	21	21	21
11-12	0,95	0,89	0,79	0,8	44,1	42,4	34	22,3	0	0	0	0	8,2	8	7,7	7	23,9	23,7	22,9	21,8
12-13	0,97	0,95	0,89	0,8	53,6	48,7	43,8	37,3	19,8	12,2	6,6	0	20,5	17,4	12,2	7,6	27,1	26,7	25,4	23,5
13-14	1	1	1	1	60,2	58,6	54,3	52,2	21,1	13,3	8,2	4,7	49,9	46,6	17	12,6	30,2	29,7	28,2	26,1
14-15	0,97	0,95	0,89	0,8	57,9	55,6	48,4	39,4	21,8	13,8	8,8	5,4	51,2	47,4	20,8	16,5	32,3	31,7	31,5	29,4
15-16	0,95	0,89	0,75	0,62	52,7	49,8	39,3	25,6	22,5	14,2	9,2	5,7	52,9	48	45,5	19,8	34,2	33,6	34,4	31,9
16-17	0,92	0,84	0,69	0,43	44,8	41,4	27,9	10,5	23,1	14,6	9,4	5,8	53,7	47,7	43,2	23	36,1	35,4	35,9	33,6
17-18	0,88	0,77	0,56	0,2	33,7	29,9	14,2	3,2	23,5	14,9	9,5	5,9	52,9	46	39,7	25,8	37,4	36,7	36,9	34,5
18-19	0,83	0,67	0,38	-	20,4	16,3	3,7	2,7	23,9	15,1	9,6	6	50,7	43,1	37,8	28,8	38,3	37,7	37,4	35,3
19-20	0,74	0,51	0,1	-	7,2	3,8	2,8	2	24,2	15,3	9,7	6,1	48,1	42,4	41	31,8	38,8	38,1	37,5	35,9
20-21	0,55	0,17	-	-	2,6	2,3	1,7	1,2	24,4	15,4	9,8	6,2	49,6	45,6	44	34,7	38,9	38,2	37,5	36,4
21-22	0,25	-	-	-	0,7	0,6	0,5	0,4	24,5	15,5	9,9	6,2	52,1	45,6	46,6	37,3	38,3	37,8	37,2	36,7
22-23	-	-	-	-	-	-	-	-	24,6	15,6	9,9	6,3	52,9	48,2	48	39	37,5	37,2	36,8	36,8
23-24	-	-	-	-	-	-	-	-	24,5	15,6	9,9	6,3	52,5	49,4	48	39,6	35,8	35,7	35,5	36
24-1	-	-	-	-	-	-	-	-	24,4	15,5	9,9	6,3	51,5	48,7	47,5	39,7	34,3	34,3	34,2	35,2
1-2	-	-	-	-	-	-	-	-	24,3	15,4	9,8	6,3	49,6	47,4	46,3	39,3	32,6	32,8	32,9	33,9
2-3	-	-	-	-	-	-	-	-	24,1	15,3	9,8	6,2	47	45,1	44,4	38,2	31,2	31,4	31,7	32,9
3-4	-	-	-	-	-	-	-	-	23,8	15,2	9,7	6,2	43,8	42,2	41,8	36,6	29,7	30,1	30,4	31,7
4-5	-	-	-	-	-	-	-	-	23,5	15	9,6	6,15	39,9	38,7	38,5	34,4	28,5	28,9	29,3	30,9
5-6	0,25	-	-	-	0,7	0,6	0,4	0,3	23,2	14,8	9,5	6,1	35,5	35,7	34,8	31,9	27,3	27,8	28,7	30,2
6-7	0,55	0,17	-	-	2,4	2,1	1,5	1,2	22,7	14,6	9,3	6	31	30,4	30,9	29,1	26,4	26,9	27,5	29,5
7-8	0,74	0,51	0,1	-	6,9	3,4	2,4	1,9	22,3	14,3	9,1	5,9	28,2	26,3	26,8	26,2	25,8	26,4	26,9	29
8-9	0,83	0,67	0,38	-	19,7	15,6	3	2,4	21,7	13,9	8,9	5,8	30,8	26,7	20,9	23,3	25,8	26,2	26,5	28,7
9-10	0,88	0,77	0,56	0,2	32,5	28,7	13	2,7	21,2	13,6	8,7	5,7	34,7	30,8	18,6	20,7	26,3	26,5	26,8	28,5
Зрелость бетона, градусо-часы															757,7	754,5	752,6	750,4		

Таблица 2 – Результаты расчета температуры в середине бетонного образца, твердеющего при разной толщине воздушной прослойки  $\delta_{в.п.}$  в опалубочной форме с прозрачным покрытием в климатических условиях 44° с.ш., июль

Время, ч	$\kappa_m$ при $\delta_{в.п.}$ , мм				$Q_{ногл}$ [кДж] при $\delta_{в.п.}$ , мм				$h_k^{\delta-n}$ [Вт/ $^0\text{C} \cdot \text{м}^2$ ] при $\delta_{в.п.}$ , мм				$Q_{ном}$ [кДж] при $\delta_{в.п.}$ , мм				$t_\delta$ [ $^0\text{C}$ ] при $\delta_{в.п.}$ , мм			
	5	15	30	60	5	15	30	60	5	15	30	60	5	15	30	60	5	15	30	60
10-11	0,96	0,88	0,76	0,55	58,2	52,6	44,6	29,3	-	-	-	-	-16	-16	-16	-17	12	12	12	12
11-12	0,98	0,93	0,85	0,71	66,9	63	57,2	46,3	-	-	-	-	-16	-16	-17	-17	16	15,7	15,3	14,6
12-13	0,99	0,96	0,93	0,86	72,8	70,6	67,5	61,6	-	-	-	-	-15	-15	-15	-16	20,6	20,7	19,5	18,3
13-14	1	1	1	1	75,6	75,5	75,5	75,5	-	-	-	-	-12	-12	-13	-14	25,8	25,3	24,5	22,9
14-15	0,99	0,96	0,93	0,86	72,9	70,8	67,7	61,7	-	-	-	-	-7,6	-8	-8,8	-10	32,3	31,7	30,9	29,4
15-16	0,98	0,93	0,85	0,71	67,4	63,4	57,6	46,6	-	-	-	-	-2,5	-3	-4,1	-5,7	39,7	38	37	35,2
16-17	0,96	0,88	0,76	0,55	57,2	51,7	43,6	28,4	-	-	-	-	3,6	3	1,4	-1	45,8	44,9	43,7	41,3
17-18	0,94	0,82	0,65	0,32	49,5	41,8	30,9	10,5	32,9	16	9,8	-	42,3	36,3	28	4,6	50,9	49,8	48,2	45,2
18-19	0,9	0,72	0,45	-	35,5	27,1	15,3	1,2	35,1	17,2	10,7	6,5	44	37,1	27,6	15,1	55,4	54,2	52,4	49,4
19-20	0,83	0,5	0,06	-	19,9	11	1,2	0,9	36,5	17,9	11,3	7	44,7	37,3	28,4	23,1	57,9	56,6	54,7	51,6
20-21	-	-	-	-	-	-	-	-	37,5	18,4	11,6	7,2	42	39,2	35,5	30,3	58,8	57,4	55,4	52,4
21-22	-	-	-	-	-	-	-	-	38,1	18,7	11,8	7,4	47,4	44,7	41,1	36,2	59,6	58,3	56,4	53,6
22-23	-	-	-	-	-	-	-	-	38,4	18,9	12	7,5	51,1	48,5	45,2	40,4	59,8	58,5	56,7	54,1
23-24	-	-	-	-	-	-	-	-	38,6	19	12	7,6	53,5	51,1	47,9	43,4	58,9	57,6	55,8	53,3
24-1	-	-	-	-	-	-	-	-	38,6	19,1	12,1	7,6	54,8	52,5	49,4	45,3	58,1	57	55,3	53
1-2	-	-	-	-	-	-	-	-	38,6	19	12,1	7,6	54,8	52,7	49,9	45,9	57,2	56,2	54,7	52,5
2-3	-	-	-	-	-	-	-	-	38,5	19	12,1	7,6	53,2	51,3	48,8	45,1	55,9	55	53,5	51,6
3-4	-	-	-	-	-	-	-	-	38,2	18,9	12	7,5	50,2	48,5	46,2	42,8	54,4	53,6	52,3	50,4
4-5	-	-	-	-	-	-	-	-	37,8	18,7	11,8	7,45	46,3	44,8	42,7	39,6	52,8	52,1	50,9	49,2
5-6	-	-	-	-	-	-	-	-	37,3	18,4	11,7	7,4	41,6	40,3	38,4	35,6	51,2	50,6	49,5	47,9
6-7	-	-	-	-	-	-	-	-	36,7	18,1	11,5	7,2	36,3	35,2	33,4	30,9	49,9	49,5	48,5	47
7-8	0,83	0,5	0,06	-	19,9	11	1,2	0,9	36	17,8	11,3	7,1	40,9	35,1	28,2	25,9	48,9	48,4	47,5	46,1
8-9	0,9	0,72	0,45	-	35,5	27,1	15,3	1,4	35,3	17,4	11	6,9	44,1	38,4	30,3	20,7	48,5	47,8	46,8	45,5
9-10	0,94	0,82	0,65	0,32	49,6	42	31,5	12,2	34,5	16,9	10,7	6,6	47,1	41,8	34,2	21,3	49	48,1	46,9	45,4

Зрелость бетона, градусо-часы

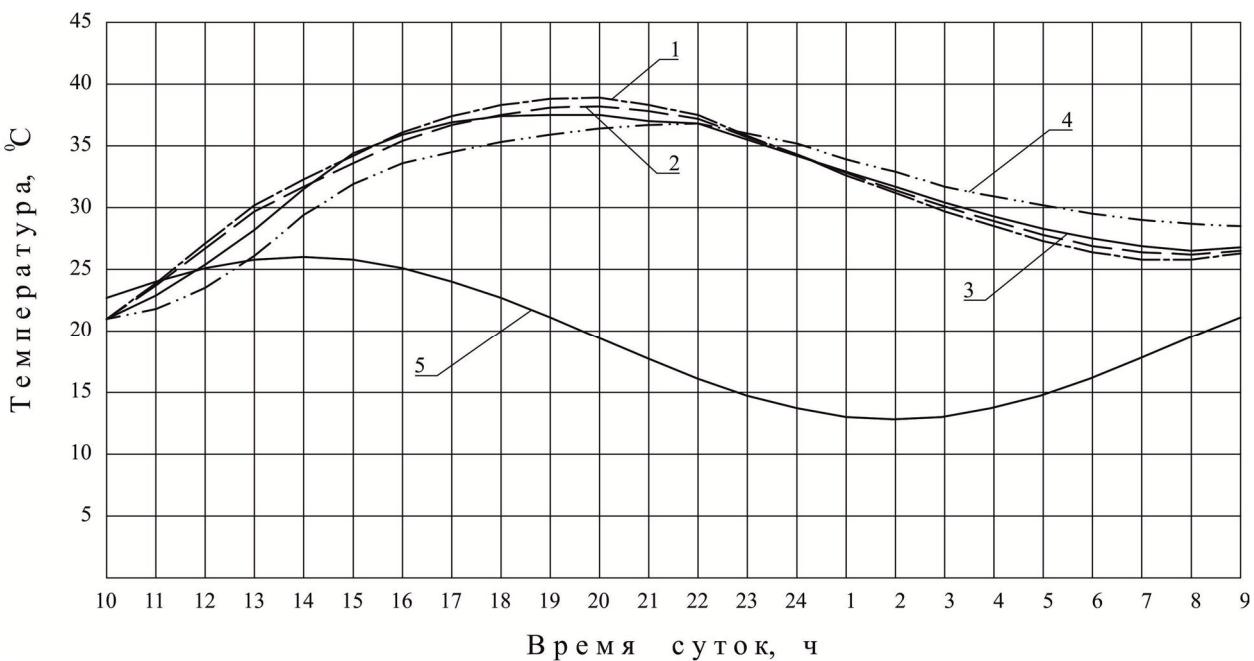
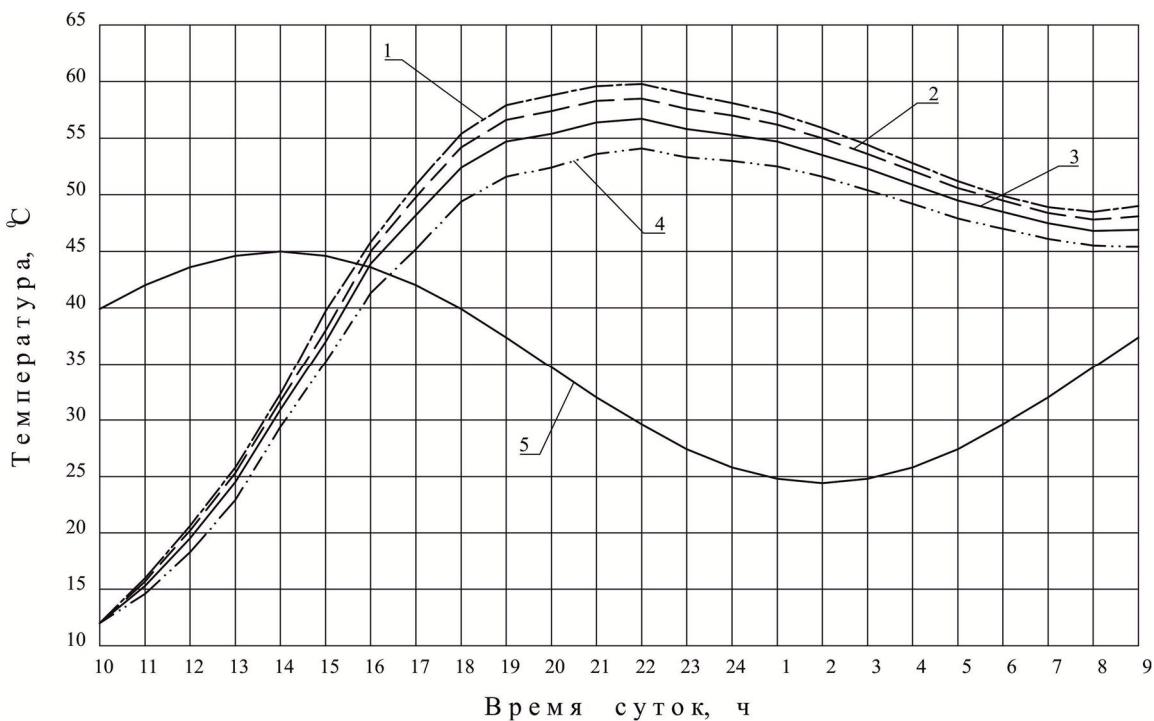


Рисунок 2 – Температура бетона, твердеющего при разной толщине воздушной прослойки в опалубочной форме с прозрачным покрытием в климатических условиях 56° с.ш., июль

1 – температура в середине бетонного образца при  $\delta_{в.п.}=10$  мм; 2 – при  $\delta_{в.п.}=20$  мм; 3 – при  $\delta_{в.п.}=40$  мм;  
4 – температура бетона при  $\delta_{в.п.}=80$  мм; 5 – температура наружного воздуха



**Рисунок 3 – Температура бетона, твердеющего при разной толщине воздушной прослойки в опалубочной форме с прозрачным покрытием в климатических условиях 44° с.ш., июль**  
 1 – температура в середине бетонного образца при  $\delta_{в.п.}=5$  мм; 2 – при  $\delta_{в.п.}=15$  мм;  
 3 – бетона при  $\delta_{в.п.}=30$  мм; 4 – при  $\delta_{в.п.}=60$  мм; 5 – температура наружного воздуха.

Анализ результатов исследований свидетельствует, что увеличение толщины воздушной прослойки приводит к снижению средней температуры твердения бетона, а также показателей его зрелости.

С ростом среднесуточной температуры наружного воздуха и интенсивности солнечного излучения повышение толщины воздушной прослойки оказывает более значительное отрицательное влияние на формирование температуры в бетоне. Несмотря на то, что характер изменения температурных кривых на рисунке 2 и рисунке 3 идентичен, увеличение  $\delta_{в.п.}$  от 5 до 60 мм не приводит к снижению тепловых потерь в ночные часы, значительно увеличивая при этом дефицит поступления солнечного излучения на солнцевоспринимающую поверхность бетона в дневные часы.

Повышение  $\delta_{в.п.}$  способствует более медленному насыщению воздуха внутри воздушной прослойки водяными парами, соответственно более позднему выпадению капельного конденсата на внутренней поверхности прозрачного покрытия.

Результаты теплофизических расчетов и экспериментальных исследований свидетельствуют, что оптимальной является толщина воздушной прослойки между железобетонным изделием и прозрачным покрытием в пределах 5...15 мм.

С конструктивной точки зрения малая толщина воздушной прослойки сопряжена с возможностью контакта пленочного покрытия с поверхностью бетона, особенно при значительных размерах прогреваемого изделия.

Так как в выражениях (1)-(4) при увеличении значений  $\delta_{в.п.}$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  в  $n$  раз значения  $k_m$  не изменяются, допустимо увеличивать толщину воздушной прослойки пропорционально увеличению размеров опалубочной формы, тем не менее превышение значений  $\delta_{в.п.}=20...30$  мм не целесообразно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Подгорнов, Н.И. Термообработка бетона с использованием солнечной энергии [Текст] / Н.И. Подгорнов. – М.: АСВ, 2010. – 328 с.

2. Коротеев, Д.Д. Организационно-технологическое обеспечение производства железобетонных изделий в полигонных условиях с использованием солнечной энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.22 / Д.Д. Коротеев. – Москва, 2011. – 175 с.

3. Король, Е.А. Экспериментальные исследования влияния климатических воздействий на монолитную связь бетонных слоев различной прочности многослойных конструкциях [Текст] / Е.А. Король, Ю.А. Харькин, Е.Н. Быков // Вестник МГСУ. – 2008. – №3. – С. 164-169.

### Подгорнов Николай Иосифович

Московский государственный строительный университет, г. Москва

Доктор технических наук, профессор кафедры «Организация и реновация производства»

Тел.: +7 (499) 726-15-17, +7 (909)683-87-09

### Коротеев Дмитрий Дмитриевич

Российский университет дружбы народов, г. Москва

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирования и строительства промышленных и гражданских сооружений»

Тел.: +7 (499) 170-99-31, +7 (926) 267-81-71

E-mail: korotey@inbox.ru

N. PODGORNOV, D. KOROTEEV

### THE INFLUENCE OF AIR LAYER'S THICKNESS ON CONCRETE'S TEMPERATURE FORMATION DURING MATURING IN SHUTTERING FORMS WITH TRANSPARENT COVERING

*The researches results of influence of air layer's thickness between transparent covering and concrete on energy efficiency concrete's heat treatment in shuttering form with using solar energy in different climatic conditions are given. Optimal significance of air layer's thickness between ferroconcrete item and transparent covering are produced on basis of thermalphysic calculations and experimental researches. The permissible significances of air layer's thickness depending on construction of shuttering forms are produced.*

**Keywords:** heat treatment of concrete, solar energy, shuttering form, air layer's thickness, transparent covering, energy efficiency.

### BIBLIOGRAPHY

1. Podgornov, N.I. Termoobrabotka betona s ispol'zovaniem solnechnoj jenergii [Tekst] / N.I. Podgornov. – M.: ASV, 2010. – 328 s.

2. Koroteev, D.D. Organizacionno-tehnologicheskoe obespechenie proizvodstva zhelezobetonnyh izdelij v poligonyh uslovijah s ispol'zovaniem solnechnoj jenergii: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.22 / D.D. Koroteev. – Moskva, 2011. – 175 s.

3. Korol', E.A. Jeksperimental'nye issledovanija vlijanija klimaticeskikh vozdejstvij na monolitnuju svjaz' bетonnyh sloev razlichnoj prochnosti mnogoslojnyh konstrukcijah [Tekst] / E.A. Korol', Ju.A. Har'kin, E.N. Bykov // Vestnik MGSU. – 2008. – №3. – S. 164-169.

### N. Podgornov

Moscow state building university, Moscow

Doctor of technical sciences, professor of the department «Organization and renovation of production»

Ph.: +7 (499) 726-15-17, +7 (909)683-87-09

### D. Koroteev

Peoples' friendship university of Russia, Moscow

Candidate of technical sciences, docent of the department «Design and construction of industrial and civil buildings»

Ph.: +7 (499) 170-99-31, +7 (926) 267-81-71

РУМЯНЦЕВА В.Е., КОНОВАЛОВА В.С., ВИТАЛОВА Н.М.

## ИНГИБИРОВАНИЕ КОРРОЗИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Данная работа посвящена изучению влияния ингибиторов коррозии, традиционно вводимых в бетонную смесь и редко использующихся, на анодное поведение арматурных стержней. На основании опытных данных по исследованию жидкостной коррозии железобетонов в различных средах предложены несколько неорганических ингибиторов, наиболее замедляющих коррозию железобетонных конструкций, оценено действие ингибиторов на коррозионный процесс арматуры и бетона в отдельности и на коррозию системы арматура-бетон, по полученным графическим зависимостям рассчитаны показатели скорости коррозии и на основе комплексного анализа была подобрана оптимальная ингибирующая добавка. Проведенные исследования и представленные опытные данные дают представление о коррозионных процессах в различных средах арматуры и бетона и служат основой для прояснения особенностей коррозии и способов ее устранения в системе арматура-бетон.*

**Ключевые слова:** ингибиторы коррозии, железобетонные конструкции, стальная арматура, скорость коррозии, защита от коррозии.

Количество металла, превращенного в продукты коррозии за определенное время, относят к коррозионным потерям. Коррозионные потери единицы поверхности металла в единицу времени характеризуют скорость коррозии. Эффект повреждений, связанный с потерями механической прочности металла, определяют термином – коррозионное разрушение, глубину его в единицу времени – скоростью проникновения коррозии. Коррозионную стойкость определяют качественно и количественно – скоростью коррозии в данных условиях [1].

Для предотвращения коррозионного процесса или снижения его скорости в агрессивную среду вводят специальные добавки – ингибиторы коррозии. Согласно стандарту ISO 8044-1986 ингибиторами коррозии (ИК) называют химические соединения, которые, присутствуя в коррозионной системе в достаточной концентрации, уменьшают скорость коррозии без значительного изменения любого коррозионного реагента. Ингибиторами коррозии могут быть и композиции химических соединений. Содержание ингибиторов в коррозионной среде должно быть небольшим [2].

Существует два типа ингибиторов коррозии: анодные и катодные. Анодные ингибиторы зависят от наличия защитного пассивного слоя на поверхности стальной арматуры. Катодная защита основана на препятствовании проникновению кислорода в бетон. Анодные ингибиторы представляют более эффективную защиту, чем катодные, и именно они обычно применяются на практике. Самым распространенным анодным ингибитором является нитрат кальция, который хорошо известен своей совместимостью с заливкой бетонной смеси на месте и не имеет неблагоприятного воздействия на свойства бетона, даже после его отверждения. Другими ингибиторами являются нитраты калия и натрия, которые имеют очень высокую эффективность по предотвращению коррозии. Однако они не так широко используются, как нитрат кальция, поскольку, в случаях присутствия компонентов с высокой щелочностью, они могут реагировать с цементом, вызывая много проблем [3].

Объектами исследования явились арматурная сталь, а также образцы бетона. О коррозионном состоянии сплава можно судить по характеру анодных поляризационных кривых. Поэтому изучение влияния различных добавок в коррозионную среду на устойчивость стали в агрессивных системах является актуальным. С помощью метода поляризационных измерений получены анодные поляризационные кривые в 10% растворе NaCl без добавок и с добавками нитритов калия и натрия, нитратов магния, цинка и кальция, а также хромата калия.

Механизм, по которому эти добавки ингибируют коррозию, связан со стабилизацией пассивирующей пленки, которая разрушается при проникновении агрессивных веществ,

например хлорид-ионов. Ингибиторы коррозии реагируют с хлоридами и тем самым снижают их концентрацию, необходимую для коррозии [3].

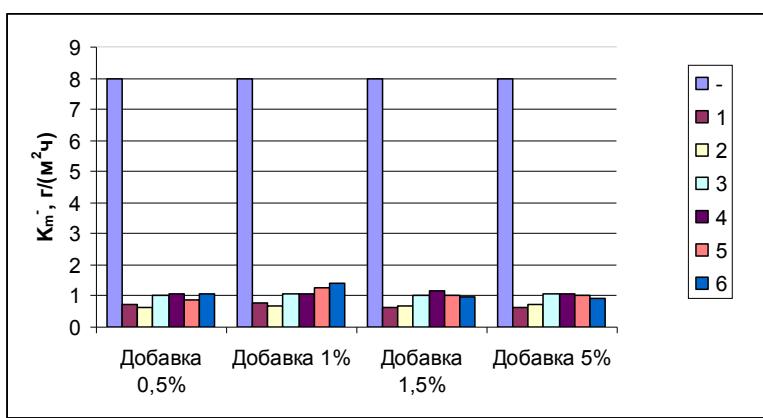
Анализ полученных поляризационных кривых показал, что в целом введение нитрита калия и нитрата цинка в малых концентрациях тормозит процесс коррозии; при больших концентрациях эти соединения являются активаторами, т.к. наблюдается его ускорение.

Исходя из полученных графических зависимостей, для наибольшего достигнутого тока рассчитан отрицательный показатель изменения массы  $K_m^-$  [4]:

$$K_m^- = \frac{IA}{26,8Sz}, \quad (1)$$

где  $I$  – коррозионный ток, А;  $A$  – атомная масса металла, г; 26,8 – количество электричества, необходимое для растворения 1 г-экв металла, А·ч;  $S$  – поверхность анода, м<sup>2</sup>;  $z$  – валентность иона металла, переходящего в раствор.

Для сравнения результатов, полученные расчетные данные представлены в виде диаграммы (рис. 1).



**Рисунок 1 – Влияние добавок ингибиторов (0,5, 1, 1,5 и 5%) на коррозионное поведение арматурной стали 1 – добавка  $KNO_2$ ; 2 – добавка  $NaNO_2$ ; 3 – добавка  $Mg(NO_3)_2$ ; 4 – добавка  $Ca(NO_3)_2$ ; 5 – добавка  $Zn(NO_3)_2$ ; 6 – добавка  $K_2CrO_4$ .**

Анализ результатов показал, что наилучшими ингибиторами коррозии арматуры являются добавки 0,5%, 1%, 1,5% и 5%  $NaNO_2$ . В этих растворах уменьшение массы образцов происходило наиболее медленно.

Методом коррозионных измерений [4] получены экспериментальные данные образцов арматуры в растворе  $NaCl$  с добавками нитритов калия и натрия, нитратов магния, цинка и кальция, а также хромата калия. С использованием графического метода для наибольшего значения достигнутого тока рассчитаны показатели коррозии: степень анодного контроля  $C_a$ , %; степень катодного контроля  $C_k$ , %; степень омического контроля  $C_{om}$ , %; показатель изменения массы  $K_m^-$ , г/м<sup>2</sup>·ч; глубинный показатель коррозии  $K_h$ , мм/год, представленные в таблицах 1-4.

Таблица 1 – Показатели коррозии Ст 3 в растворах  $NaCl$  10% с добавками

Добавка 0,5%	Степень анодного контроля $C_a$ , %	Степень катодного контроля $C_k$ , %	Степень омического контроля $C_{om}$ , %	Показатель изменения массы $K_m^-$ г/м <sup>2</sup> ·ч	Глубинный показатель коррозии $10^3 K_h$ , мм/год
-	9	73	18	2,55	6,82
$KNO_2$	18	59	23	1,02	1,15
$Mg(NO_3)_2$	15	59	26	1,26	1,41
$Ca(NO_3)_2$	14	57	29	1,32	1,48
$NaNO_2$	20	42	38	1,563	1,75
$Zn(NO_3)_2$	13	64	23	1,63	1,83
$K_2CrO_4$	14	61	25	1,055	1,21

**Таблица 2 – Показатели коррозии Ст3 в растворах NaCl 10% с добавками**

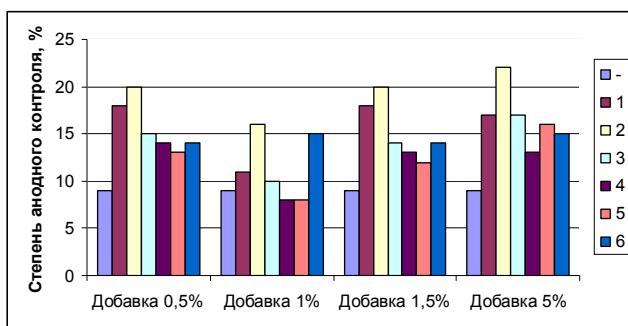
Добавка 1%	Степень анодного контроля $C_a, \%$	Степень катодного контроля $C_k, \%$	Степень омического контроля $C_{om}, \%$	Показатель изменения массы $K_m \text{ г/м}^2 \text{ ч}$	Глубинный показатель коррозии $10^3 K_h, \text{ мм/год}$
-	9	73	18	2,55	6,82
$\text{KNO}_3$	11	64	25	1,904	2,25
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	10	61	29	2,44	2,89
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	8	54	38	5,57	6,59
$\text{NaNO}_3$	16	59	25	1,99	2,35
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$	8	23	14	0,929	1,099
$\text{K}_2\text{CrO}_4$	15	55	30	1,388	1,554

**Таблица 3 – Показатели коррозии Ст 3 в растворах NaCl 10% с добавками**

Добавка 1,5%	Степень анодного контроля, $C_a, \%$	Степень катодного контроля, $C_k, \%$	Степень омического контроля, $C_{om}, \%$	Показатель изменения массы, $K_m \text{ г/м}^2 \text{ ч}$	Глубинный показатель коррозии $10^3 K_h, \text{ мм/год}$
-	9	73	18	2,55	6,82
$\text{KNO}_3$	18	60	22	0,891	1,001
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	14	61	25	0,846	0,95
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	13	59	28	1,271	1,43
$\text{NaNO}_3$	20	42	38	1,563	1,75
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$	12	77	21	0,899	1,01
$\text{K}_2\text{CrO}_4$	14	62	24	0,982	1,133

**Таблица 4 – Показатели коррозии Ст 3 в растворах NaCl 10% с добавками**

Добавка 5%	Степень анодного контроля $C_a, \%$	Степень катодного контроля $C_k, \%$	Степень омического контроля $C_{om}, \%$	Показатель изменения массы $K_m \text{ г/м}^2 \text{ ч}$	Глубинный показатель коррозии $10^3 K_h, \text{ мм/год}$
-	9	73	18	2,55	6,82
$\text{KNO}_3$	17	71	12	1,6562	1,843
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	17	69	14	1,7854	1,5643
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	13	75	12	1,4965	1,67
$\text{NaNO}_3$	22	64	14	1,5716	1,75
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$	16	75	9	1,34	1,49
$\text{K}_2\text{CrO}_4$	15	68	17	0,938	1,104



**Рисунок 2 – Ингибирующее влияние добавок ингибиторов (0,5, 1, 1,5, 5%) на коррозию арматурной стали 1 – добавка  $\text{KNO}_3$ ; 2 – добавка  $\text{NaNO}_3$ ; 3 – добавка  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ; 4 – добавка  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ; 5 – добавка  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ ; 6 – добавка  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ .**

Судя по показателям коррозии, наилучшими ингибирующими свойствами обладают добавки нитратов калия, натрия и магния (при высокой степени анодного контроля низкие показатели изменения массы и глубинные показатели коррозии). Увеличение содержания ингибиторов до концентрации, равной 5%, оказалось нецелесообразным, поскольку возрастание

степени анодного контроля для них не сопровождается увеличением показателей изменении массы и глубинных показателей коррозии. Наиболее оптимальна концентрация добавки 0,5%, поэтому для дальнейших исследований были использованы добавки нитратов калия, натрия и магния с таким содержанием в коррозионной среде.

Результаты исследований коррозии стали с комбинированными добавками ингибиторов приведены в таблице 5. Очевидно, что комбинирование добавок дает лучшие показатели коррозии, чем использование добавок по отдельности.

**Таблица 5 – Показатели коррозии Ст3 в растворах NaCl 10% с комбинированными добавками**

Добавка 1%	Степень анодного контроля $C_a, \%$	Степень катодного контроля $C_k, \%$	Степень омического контроля $C_{om}, \%$	Показатель изменения массы $K_m \text{ г/м}^2 \text{ ч}$	Глубинный показатель коррозии $10^3 K_h, \text{ мм/год}$
-	9	73	18	2,55	6,82
$\text{KNO}_2 + \text{NaNO}_2$	11	74	15	1,78	1,98
$\text{NaNO}_2 + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	14	79	7	0,94	1,05
$\text{KNO}_2 + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	16	75	9	0,985	1,03
$\text{KNO}_2 + \text{NaNO}_2 + \text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	24	62	14	0,9246	1,14

В рамках эксперимента по исследованию массообменных процессов при жидкостной коррозии железобетонов с целью разработки их математических моделей проведены исследования коррозионной стойкости бетона, как в воде, так и с добавками нитратов натрия, калия и магния. Их выбор обусловлен наибольшей эффективностью ингибирования процесса коррозии стальной арматуры.

Известно, что при изготовлении железобетонных изделий и конструкций в бетоне образуется «свободный гидроксид кальция», который и является причиной его коррозии. Процесс коррозии бетона обусловлен диффузией гидроксида кальция из толщи бетона к его поверхности, граничащей со средой, а также переходом вещества через границу раздела фаз «твёрдое тело – жидкость» и растворением в жидкой среде [5].

На практике очень важным случаем является коррозия в условиях ограниченного объема жидкой среды.

Отличительной чертой такого процесса является то, что переход переносимого компонента из твердой фазы в жидкую происходит при так называемых условиях ограниченного объема жидкой фазы, и концентрация вещества в последней меняется в ходе процесса [5].

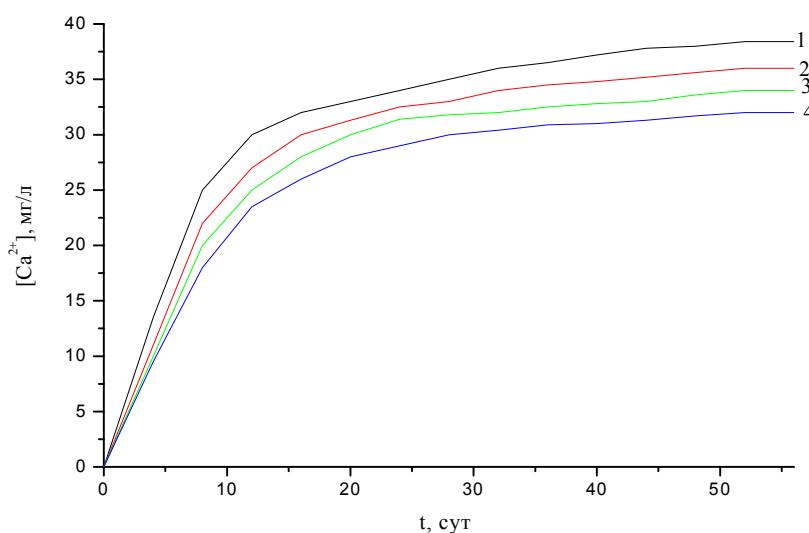
В соответствии с методикой проведения исследований пластины из бетона, составляющие образцы-кубы, подвергались дифференциально-термическому анализу, результаты которого сведены в таблицу 6.

По данным дифференциально-термического анализа во всех пробах зафиксировано снижение содержания гидроксида кальция по эндоэффекту при температуре 430-480°C, причем введение ингибиторов замедляет уменьшение вымывания гидроксида кальция.

Кроме того, методом объемного титрования проводился контроль содержания катиона кальция в воде, результаты которого представлены на рисунке 3.

Таблица 6 – Содержание гидроксида кальция в образцах, %

	Добавки	Контр.	14 сут.	28 сут	42 сут.	56 сут.
Внешняя пластина	вода	2,03	1,58	1,34	1,33	1,29
	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1,99	1,56	1,30	1,29	1,24
	KNO <sub>2</sub>	1,97	1,3	1,28	1,28	1,22
	NaNO <sub>2</sub>	1,91	1,50	1,27	1,24	1,17
Средняя пластина	вода	2,03	1,92	1,68	1,36	1,36
	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1,97	1,88	1,62	1,35	1,33
	KNO <sub>2</sub>	1,95	1,86	1,60	1,32	1,27
	NaNO <sub>2</sub>	1,91	1,82	1,58	1,29	1,25
Внутренняя пластина	вода	2,03	2,01	1,72	1,51	1,43
	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1,99	1,86	1,66	1,51	1,37
	KNO <sub>2</sub>	1,97	1,96	1,63	1,46	1,33
	NaNO <sub>2</sub>	1,91	1,90	1,60	1,44	1,30



*Рисунок 3 – Изменение концентрации катионов  $\text{Ca}^{2+}$  в воде (1), с добавками  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  (2);  $\text{KNO}_2$  (3);  $\text{NaNO}_2$  (4)*

Полученные результаты позволяют определять значение концентраций переносимого компонента (гидроксида кальция) по толщине конструкции в любой момент времени и, кроме того, дают возможность расчета содержания этого вещества в жидкой фазе и среднее содержание по толщине и объему конструкции, т.е. расчета кинетики процесса по твердой и жидкой фазам.

Проведенные исследования и представленные опытные данные дают представление о коррозионных процессах в различных средах арматуры и бетона и служат основой для прояснения особенностей коррозии и способов ее устранения в системе арматура-бетон.

### Выводы

1. В качестве наилучших ингибиторов коррозии определены добавки нитратов калия, магния и натрия с концентрацией 0,5%.
2. Установлена целесообразность комбинирования добавок нитратов калия, натрия и магния с концентрацией 0,5% с целью увеличения коррозионной стойкости арматурной стали.
3. Рассмотрено влияние ингибирующих добавок нитратов металлов на вымывание гидроксида кальция из бетона.
4. Целесообразно продолжать исследование влияния нитрата натрия с концентрацией 0,5% на коррозионное поведение арматурной стали и создание на основе него новейшего комбинированного ингибитора.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ИСО 8044:1986 Коррозия металлов и сплавов. Термины и определения [Текст].
2. Алексеев, С.Н. Ингибиторы коррозии стали в железобетонных конструкциях [Текст] / С.Н. Алексеев, В.Б. Ратинов, Н.К. Розенталь, Н.К. Кашурников. – М.: Стройиздат, 1985. – 272 с.
3. Mohamed El-Reedy. Steel-reinforced concrete structures: assessment and repair of corrosion. Taylor & Francis Group, 2008. 218 p.
4. Томашов, Н.Д. Лабораторные работы по коррозии и защите металлов [Текст] / Н.Д. Томашов, Н.П. Жук, В.А. Титов, М.А. Веденеева. – М.: Металлургия. 1971. – 140 с.
5. Федосов, С.В. Вопросы прогнозирования долговечности строительных конструкций [Текст] / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.А. Хрунов, М.Е. Шестеркин // Строительство и реконструкция, №5 (37). – 2011. – С. 63-70.

**Румянцева Варвара Евгеньевна**

Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Химия, экология и микробиология»  
E-mail: vargym@gmail.ru

**Коновалова Виктория Сергеевна**

Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново  
Аспирант кафедры «Химия, экология и микробиология»  
E-mail: kotprotiv@yandex.ru

**Виталова Нина Михайловна**

Ивановский государственный политехнический университет, г. Иваново  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции»  
E-mail: k\_sk@ivgpu.com

---

V. RUMYANTSEVA, V. KONOVALOVA, N. VITALOVA

## **CORROSION INHIBITION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**

*This work is devoted to the study of influence of corrosion inhibitors, traditionally entered into a concrete mix and rarely used, on the anodic behavior of reinforcements. On the basis of experimental data of liquid corrosion of reinforced concrete study in different environments several inorganic inhibitors that the most inhibit corrosion of concrete structures were offered, the effect of corrosion inhibitors on the process of reinforcement and concrete separately and corrosion system armature-concrete was assessed, on the obtained graphic dependences the speed of corrosion was calculated, and on the basis of the complex analysis optimal inhibiting additive was chosen. Studies and presents experimental data give an idea of the corrosion processes of reinforcement and concrete in different environments and serve as a basis for clarifying the characteristics of corrosion and how to resolve it in the system armature-concrete.*

**Keywords:** corrosion inhibitors, reinforced concrete structures, steel reinforcement, corrosion rate, protection from corrosion.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. ISO 8044:1986 Korrozija metallov i splavov. Terminy i opredelenija [Tekst].
2. Alekseev, S.N. Ingibitory korrozii stali v zhelezobetonnyh konstrukcijah [Tekst] / S.N. Alekseev, V.B. Ratinov, N.K. Rozental', N.K. Kashurnikov. – M.: Strojizdat, 1985. – 272 s.
3. Mohamed El-Reedy. Steel-reinforced concrete structures: assessment and repair of corrosion. Taylor & Francis Group, 2008. 218 p.
4. Tomashov, N.D. Laboratornye raboty po korrozii i zashhite metallov [Tekst] / N.D. Tomashov, N.P. Zhuk, V.A. Titov, M.A. Vedeneeva. – M.: Metallurgija. 1971. – 140 s.

5. Fedosov, S.V. Voprosy prognozirovaniya dolgovechnosti stroitel'nyh konstrukcij [Tekst] / S.V. Fedosov, V.E. Rumjanceva, V.A. Hrunov, M.E. Shesterkin // Stroitel'stvo i rekonstrukciya, №5 (37). – 2011. – S. 63-70.

**V. Romyantseva**

Ivanovo state polytechnical university, Ivanovo

Doctor of technical sciences, professor of the department «Chemistry, ecology and microbiology»

E-mail: varrym@gmail.ru

**V. Konovalova**

Ivanovo state polytechnical university, Ivanovo

Post-graduate student of the department «Chemistry, ecology and microbiology»

E-mail: kotprotiv@yandex.ru

**N. Vitalova**

Ivanovo state polytechnical university, Ivanovo

Candidate of technical sciences, docent of the department «Building constructions»

E-mail: k\_sk@ivgpu.com

ФЕДОРОВ С.С., ЧЕРНЕЦКАЯ И.Е.

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*В данной статье рассматривается один из вариантов автоматизированной системы управления теплоснабжением промышленных предприятий, подключенных к тепловым сетям по зависимой схеме. Проанализирована работа системы управления процессом теплоснабжения в условиях поддержания постоянной температуры, отапливаемых помещений при постоянно изменяющихся погодно-климатических воздействиях. Предложен вариант энергосбережения при управлении приводом системы теплоснабжения.*

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, ресурсосбережение, теплоснабжение, энергосбережение.

Теплоэнергетика является важнейшей структурной составляющей топливно-энергетического комплекса (ТЭК), потребляющей до 40% топливных ресурсов страны. От 70 до 95% жилого фонда, общественных сооружений и зданий обеспечивается путем централизованного теплоснабжения, что составляет более 60% коммунальных расходов потребителей тепла.

Ввиду столь высокой энергоемкости задачи теплорегулирования, энергоснабжения, энергосбережения, а также вопросы по повышению надежности и эффективности с учетом контроля, качества и работоспособности существующих систем автоматизации процесса теплоснабжения требуют разработки математических моделей, которые позволяют создавать и исследовать новые алгоритмы и структуры управления процессом теплоснабжения зданий [1].

В последние годы все большую актуальность приобретают системы автоматизированного регулирования (САР) теплоснабжения. Применение САР имеет целый ряд положительных качеств:

- применение алгоритмов и управляющих программ для регулирования параметров, обеспечивает заданные условия функционирования систем теплоснабжения в автоматическом режиме;
- САР расширяет технические возможности отопительных систем и совершенствует систему контроля за их работоспособностью;
- САР осуществляет автоматический мониторинг и регулирование работоспособности систем теплоснабжения (подпитки и контроля за утечками теплоносителя, оперативной останов в случае аварии и т.п.).

Следует отметить, что автоматизированное регулирование не лишено некоторых недостатков:

- алгоритмы и управляющие программы регулирования теплоснабжения должны адекватно моделировать динамику процессов теплоснабжения в тепловых сетях;
- математические модели (ММ) и программное обеспечение (ПО) САР нуждаются в привязке к местным тепловым сетям ввиду большого разнообразия их конструкций;
- САР достаточно дорогостоящие и требуют определенных сроков окупаемости.

Опыт подсказывает, что данные недостатки можно ликвидировать за счет совершенствования и унификации ММ, ПО и элементной базы САР, что делает их более технологичными, универсальными и конкурентоспособными [3].

Рассмотрим один из вариантов математической модели, отражающей функционирование зависимой схемы присоединения системы теплоснабжения со смешением воды (рис. 1).

Предлагаемая конструкция включает в себя: подающий (1) и обратный трубопроводы (2), регулирующие клапаны с энергоприводом  $V_1$  и  $V_2$  (3, 4) смесительный насос  $N$  (5), тепловую нагрузку (обогреваемое помещение)  $R$  (6), САР (7), датчиков температуры отапливаемого помещения (8), наружного воздуха (9), теплоносителя (10).

Рассмотрим номинальный режим работы схемы на рисунке 1.

Из подающего трубопровода горячая вода поступает на клапан  $V1$ , который отрегулирован для ее подачи на тепловую нагрузку  $R$  и создания номинальной температуры в обогреваемом помещении. Далее в точке  $A$  она запитывает контур ARBA тепловой нагрузки  $R$  с помощью смесительного насоса  $N$ , поддерживающего постоянный тепловой поток части поступающей горячей воды через клапан  $V2$ . Отдавшая часть тепла вода после охлаждения в контуре попадает в обратный трубопровод и возвращается во внешнюю подающую систему. Следует отметить, что насос  $N$ , работая в номинальном режиме с постоянной частотой оборотов вала, проталкивает через клапан  $V2$  постоянную порцию охлажденной воды из контура ARBA. Если температура наружного воздуха снижается, САР пропорционально увеличивает открытие клапана  $V1$  и соответственно прикрывает клапан  $V2$ , что приводит к увеличению порции тепла, подаваемого на тепловую нагрузку  $R$ . Если температура наружного воздуха возрастает, САР пропорционально прикрывает клапан  $V1$  и соответственно открывает клапан  $V2$ , что приводит к уменьшению порции тепла, подаваемого на тепловую нагрузку  $R$ .

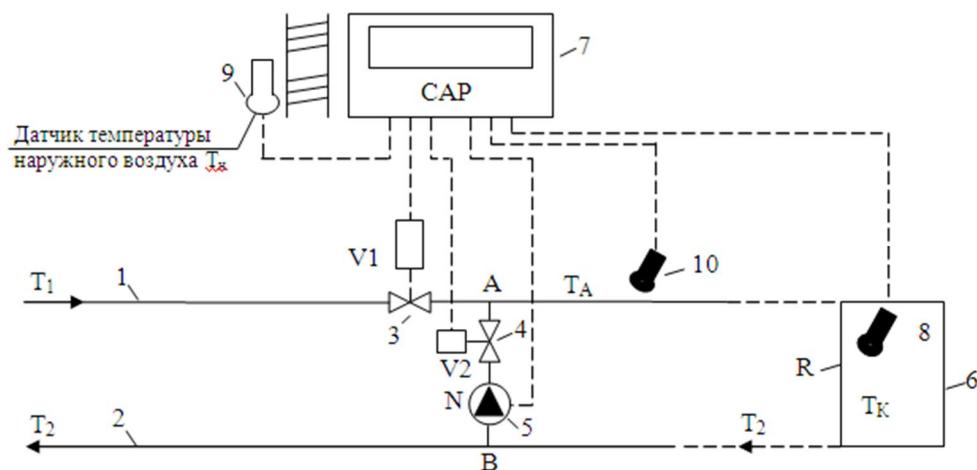


Рисунок 1 – Вариант функционирования зависимой схемы присоединения системы отопления со смешением воды

Схему на рисунке 1 можно усовершенствовать, исключив из нее питающий клапан  $V2$ , возложив его функции на смесительный насос  $N$  (рис. 2). В этом случае САР будет реагировать на изменение температуры наружного воздуха, управляя частотой оборотов вала  $N$  и входным клапаном  $V1$  (см. рис. 2).

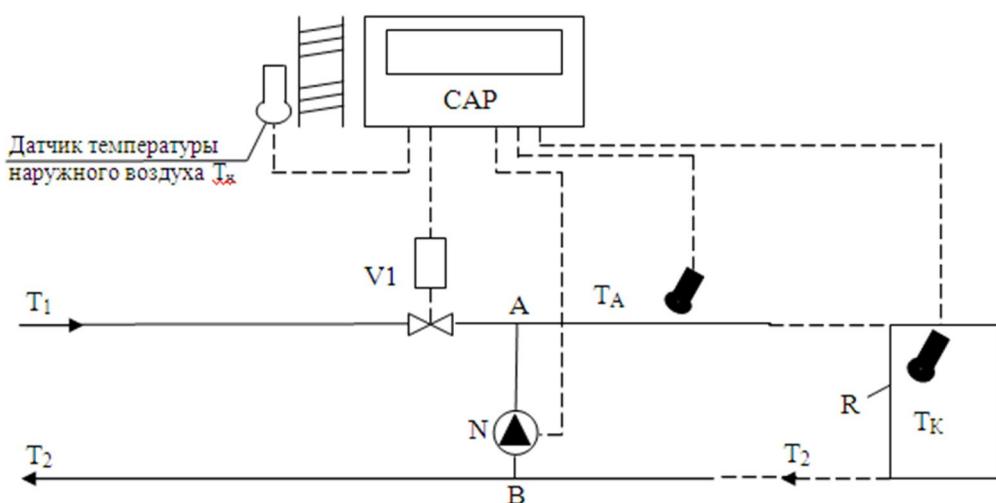


Рисунок 2 – Модифицированный вариант функционирования зависимой схемы присоединения со смешением воды

Схема на рисунке 2 менее дорогостоящая и более проста в управлении.

Рассмотрим процесс теплообмена в схеме на рисунке 2. К основным параметрам теплообмена отнесем:  $T_1, T_2$  – соответственно температуры подающего и обратного трубопроводов,  $K$ ;  $T_A, T_K, T_h$  – соответственно температуры воды за точкой  $A$  в контуре ARBA, в обогреваемом помещении и наружного воздуха,  $K$ ;  $\kappa_1, \kappa_N$  – соответственно доли полного открытия клапана V1 и полной производительности смесительного насоса  $N$ ;  $k$  – коэффициент теплопередачи фасадного ограждения,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ ;  $G_1, G_2, G_N, G_k$  – соответственно расходы воды в подающем и обратном трубопроводах, смесительном насосе  $N$ , отапливаемом помещении (тепловой нагрузке  $R$ ),  $\text{кг}/\text{ч}$ ;  $Q_1, Q_2, Q_N, Q_K, Q_\Phi, Q_m$  – соответственно тепловые потоки, переносимые в подающем и обратном трубопроводах, смесительном насосе  $N$ , отапливаемом помещении (тепловой нагрузке  $R$ ), подведенной фильтрацией, источников тепловыделения,  $\text{Вт}$ ;  $F$  – площадь поверхности обогреваемого помещения (тепловой нагрузки  $R$ ),  $\text{м}^2$ .

Отметим, что в номинальном режиме ко всем индексам будет добавлена буква «н».

Составим уравнение теплового баланса для тепловой нагрузки  $R$  на рисунке 2. В данном случае суммарный входной тепловой поток  $Q_{\text{вх}}$  расходуется на суммарный выходной тепловой поток  $Q_{\text{вых}}$ :

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{вых}}, \quad (1)$$

причем

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{вх}} &= Q_{1A} + Q_N + Q_\Phi + Q_m \\ Q_{\text{вых}} &= Q_K + Q_2 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} Q_{1A} &= \kappa_1 Q_1 \\ Q_\Phi &= C_1 = \text{const} \\ Q_m &= C_2 = \text{const} \\ Q_2 &= C_3 = \text{const} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Тепловые потоки  $Q_N, Q_K$  опишем особо.

При выборе смесительных насосов для систем теплоснабжения, рекомендуемых в соответствии с требованиями [4] при их установке на перемычке между подающим и обратным трубопроводами (напор – на 2-3 м больше потерь давления в системе теплоснабжения), следует вычислять подачу насоса (расход воды)  $G_N$  по формуле:

$$G_N = 1,1 u G_1, \quad (4)$$

где  $G_1$  – определяется по формуле:

$$G_1 = 3,6 \frac{Q_1}{(t_1 - t_2)C}, \quad (5)$$

где  $C = 4,266 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$  – удельная теплоемкость воды при температуре  $t_1 = 130^\circ\text{C}$ ;  $t_1, t_2$  – соответственно температуры подающего и обратного теплопроводов по шкале Цельсия  $^\circ\text{C}$ ,  $u$  – коэффициент смешения, определяемый по формуле:

$$u = \frac{t_1 - t_A}{t_A - t_2}, \quad (6)$$

где  $t_A$  – температура воды за точкой А в контуре ARBA по шкале Цельсия.

Подставляя (6), (5) в (4), получим:

$$G_N = \frac{3,96 Q_1 (t_1 - t_A)}{(t_1 - t_2)(t_A - t_2)C} \quad (7)$$

или

$$G_N = \frac{0,928 Q_1 (t_1 - t_A)}{(t_1 - t_2)(t_A - t_2)}. \quad (8)$$

Отметим, что процесс теплоснабжения в номинальном режиме стационарный, т.е. не меняет значений своих параметров в контуре теплоснабжения с течением времени (например, теплового потока, расхода жидкости и т.п.).

Если учесть, что тепловые потоки пропорциональны соответствующим расходам ( $Q_1 \sim G_1$ ,  $Q_N \sim G_N$ ), получим согласно (4) соотношение:

$$Q_N = 1,1 \text{ u } Q_1. \quad (9)$$

Если учесть, что теплая вода проводит через вентиль V1 с долей полного открытия  $k_1$ , затем эта вода прокачивается через контур ARBA, тепловой нагрузки  $R$  с помощью смесительного насоса  $N$ , работающего с долей полной производительности  $\kappa_N$ , то величину  $Q_N$  можно получить по формуле:

$$Q_N = 1,1 Q_1 \kappa_1 \kappa_N . \quad (10)$$

Тепловой поток  $Q_K$ , переносимый по контуру ARBA, передается в тепловую нагрузку  $R$  (отапливаемое помещение), создавая в нем номинальную температуру  $t_k = 20^\circ C$ . При стационарном режиме он путем теплопередачи передается через твердую стенку ограждения [2] и определяется по формуле:

$$Q_k = k(t_k - t_{\mu})F \quad (11)$$

Подставим (11), (10), (3) в (1), получим:

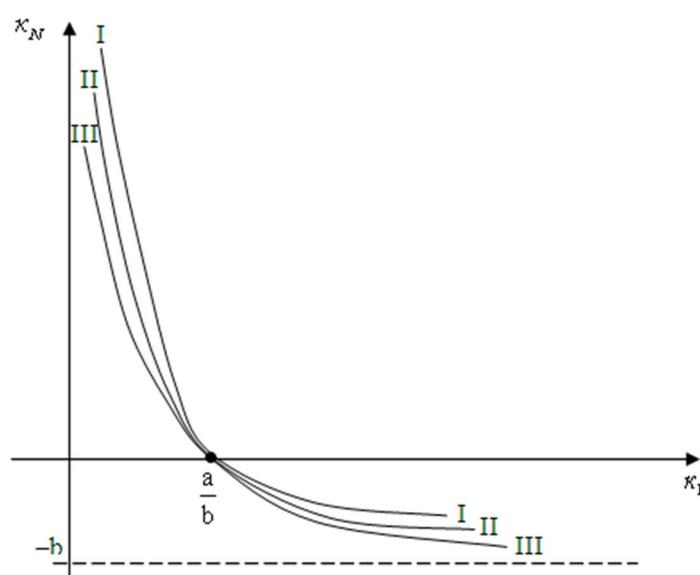
$$\kappa_1 Q_1 + 1, \kappa_1 u \kappa_1 \kappa_N + C_1 + C_2 = k(t_k - t_h) \cdot F + C_3; \quad (12)$$

$$\kappa_1 Q_1(1+1,1\cup\kappa_N) = k(t_k - t_u) \cdot F + C_3 - C_1 - C_2; \quad (13)$$

$$\kappa_1(1+1, \text{luk}_N) = \frac{1}{O_1} [k(t_k - t_h) \cdot F + C_3 - C_1 - C_2]. \quad (14)$$

Обозначив  $\frac{1}{O_1}[k(t_k - t_h) \cdot F + C_3 - C_1 - C_2] = C_4 = const$ , имеем:

$$\kappa_N = \left( \frac{C_4}{\kappa_i O_i} - 1 \right) \cdot \frac{1}{1.1u}, \quad \kappa_N = \frac{C_4}{1.1u O_i \kappa_i} - \frac{1}{1.1u}. \quad (15)$$



**Рисунок 3 – Зависимость  $\kappa_1$  от  $\kappa_N$**

Упростим формулу (15), введя новые обозначения:

$$\frac{C_4}{1.1uO_1} = a; \quad \frac{1}{1.1u} = b,$$

придем к зависимости, связывающей коэффициенты  $\kappa_1$  и  $\kappa_N$ :

$$\kappa_N = \frac{a}{\kappa_1} - b, \quad (16)$$

где  $a > 0$ ,  $b > 0$ ,  $0 < \kappa_1 < \frac{a}{b}$ .

Графически зависимость (16) изображена на рисунке 3.

Из (16) следует, что коэффициенты  $\kappa_N$  и  $\kappa_1$ , связаны обратной пропорциональной зависимостью. Причем с ростом температуры наружного воздуха  $t_n$  соответствующая кривая семейства приближается к оси абсцисс и пересекает ее в точке  $\frac{a}{b}$ . На рисунке 3 кривым I, II, III соответствуют температуры  $t_{n_I} < t_{n_{II}} < t_{n_{III}}$ . Отметим, что величина  $Q_1$  для номинального режима известна и хранится в памяти САР.

Возможный вариант энергосбережения. Анализируя формулу (16), мы получили зависимость между  $\kappa_1$  и  $\kappa_N$ , которая позволяет управлять электроприводами клапана V1 и смесительного насоса N. Очевидно, что при данном перепаде температур  $\Delta t = t_K - t_n$  желательно, чтобы расход тепла в системе теплоснабжения был минимален. В этом случае актуально требование:

$$F(\kappa_1, \kappa_N) = \kappa_1 + \kappa_N \rightarrow \min. \quad (17)$$

Учитывая (16), получим:

$$F(\kappa_1, \kappa_N) = F(\kappa_1) = \kappa_1 + \frac{a}{\kappa_1} - b \rightarrow \min. \quad (18)$$

Исследуем функцию  $F(\kappa_1)$  на локальный экстремум:

$$\frac{dF(\kappa_1)}{d\kappa_1} = 1 - \frac{a}{\kappa_1^2} \Rightarrow \frac{dF(\kappa_1)}{d\kappa_1} = 0, \text{ если } 1 - \frac{a}{\kappa_1^2} = 0, \text{ тогда:}$$

$\kappa_{11} = -\sqrt{a}$ ,  $\kappa_{12} = \sqrt{a}$  – критические точки 1-го рода. Если учесть, что  $\kappa_1 > 0$ , то остается  $\kappa_{12} = \sqrt{a}$ . Из рисунка 4 следует, что  $F(\kappa_1)$  имеет локальный минимум в точке  $\kappa_{12} = \sqrt{a}$ , причем  $F(\sqrt{a}) = 2\sqrt{a} - b$ .

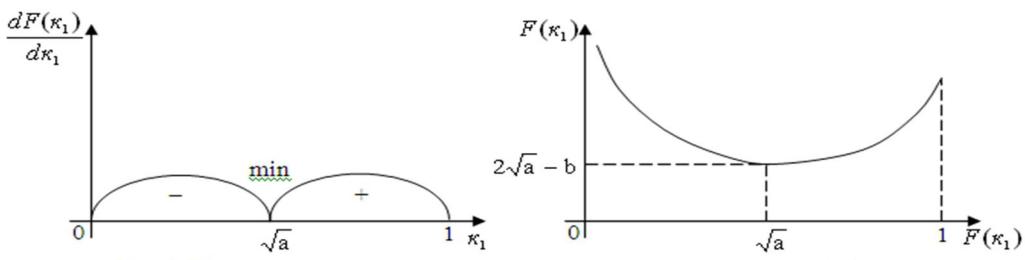


Рисунок 4 – Условия локального минимума

Рисунок 5 – Зависимость  $F(\kappa_1)$

Определим  $\frac{d^2F(\kappa_1)}{d\kappa_1^2} = \left(1 - \frac{a}{\kappa_1^2}\right)' = \frac{2a}{\kappa_1^3} > 0$ , т.е. график функции  $F(\kappa_1)$  изображен выпуклостью вниз на полуинтервале  $(0; 1]$ , точек перегиба не имеет.

### Выводы

1. Обоснован более простой вариант управления процессом теплоснабжения на рисунке 2 по сравнению со схемой на рисунке 1. Предлагаемый вариант теплоснабжения позволяет исключить один из управляемых клапанов V2, возложив функции теплорегулирования на клапан V1 и смесительный насос N. Это дает возможность оптимизировать производственные затраты на обеспечение теплом и значительно упрощает управление САР этим процессом.

2. Получена зависимость (16) между долей полного открытия клапана  $V_1$  и долей  $\kappa_N$  полной производительности насоса  $N$ , что является основой математической модели теплоснабжения.

3. Предложен вариант энергосбережения при управлении приводом системы теплоснабжения. Получены конкретные значения долей  $\kappa_1 = \sqrt{a}$  и  $\kappa_N = 2\sqrt{a} - b$ , позволяющие получить минимальный расход тепла в системе теплоснабжения на рисунке 2.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Федоров, С.С. Управление системой теплоснабжения зданий с позиции ресурсосбережения [Текст] / С.С. Федоров, Д.Н. Тютюнов, Н.В. Клюева // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет-УНПК. – 2013. – №5. – С. 36-40.

2. Чистович, С.А. Автоматизированные системы теплоснабжения и теплоснабжения [Текст] / под общ. ред. Чистович С.А. и др. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние. – 1987. – 248с.

3. Исаченко, В.П. Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия. – 1981. – 417 с.

**Федоров Сергей Сергеевич**

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Преподаватель кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»

E-mail: ssfedorov@list.ru

**Чернецкая Ирина Евгеньевна**

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

Доктор технических наук, профессор кафедры «Вычислительная техника»

E-mail: tjutjunov@mail.ru

---

S. FEDOROV, I. CHERNETSKAYA

## **AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR PROCESS HEAT SUPPLIES OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISES**

*In this article one of options of an automated control system is considered by a heat supply of the industrial enterprises connected to thermal networks on the dependent scheme. Work of a control system as heat supply process in the conditions of maintenance of the constant temperature, heated rooms is analysed at constantly changing weather and climatic influences. The energy saving option is offered at control of the drive of system of a heat supply.*

**Keywords:** automated control system, resource-saving, heat supply, energy saving.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Fedorov, S.S. Upravlenie sistemoj teplosnabzhenija zdanij s pozicij resursoberezhenija [Tekst] / S.S. Fedorov, D.N. Tjutjunov, N.V. Kljueva // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet-UNPK. – 2013. – №5. – S. 36-40.

2. Chistovich, S.A. Avtomatizirovannye sistemy teplosnabzhenija i teplosnabzhenija [Tekst] / pod obshh. red. Chistovich S.A. i dr. – L.: Strojizdat. Leningr. otd-nie. – 1987. – 248s.

3. Isachenko, V.P. Teploperedacha [Tekst] / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel. – M.: Jenergija. – 1981. – 417 s.

**S. Fedorov**

Southwest state university, Kursk

Teacher of the department «Heat and gas supply and ventilation»

E-mail: ssfedorov@list.ru

**I. Chernetskaya**

Southwest state university, Kursk

Doctor of technical sciences, professor of the department «Computer engineering»

E-mail: tjutjunov@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 присыпать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

**В тексте статьи** не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

**Обязательные элементы:**

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов 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-uprk.ru](http://www.gu-uprk.ru)**

---

*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](http://www.gu-unpk.ru)  
E-mail: [unpk@ostu.ru](mailto:unpk@ostu.ru)

*Адрес редакции*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет –  
учебно-научно-производственный комплекс»  
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)  
302006, г. Орел, ул. Московская, 77.  
+7 (4862) 73-43-49  
[www.gu-unpk.ru](http://www.gu-unpk.ru)  
E-mail: [str\\_and\\_rek@mail.ru](mailto:str_and_rek@mail.ru)

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 11.08.2014 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.