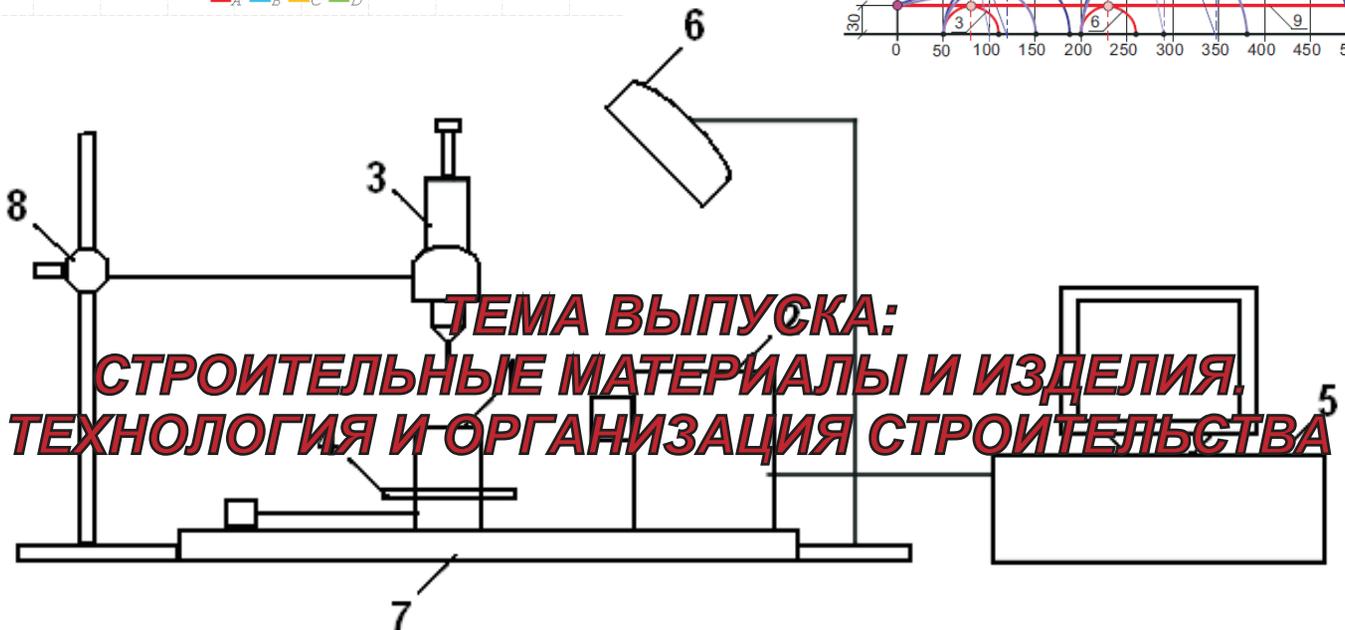
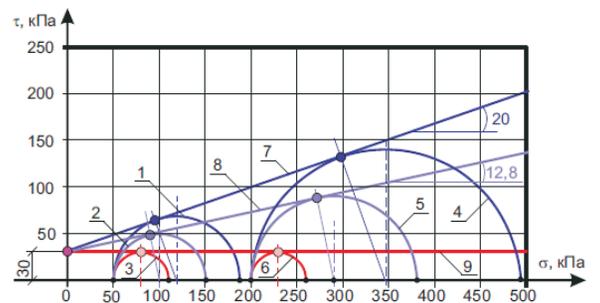
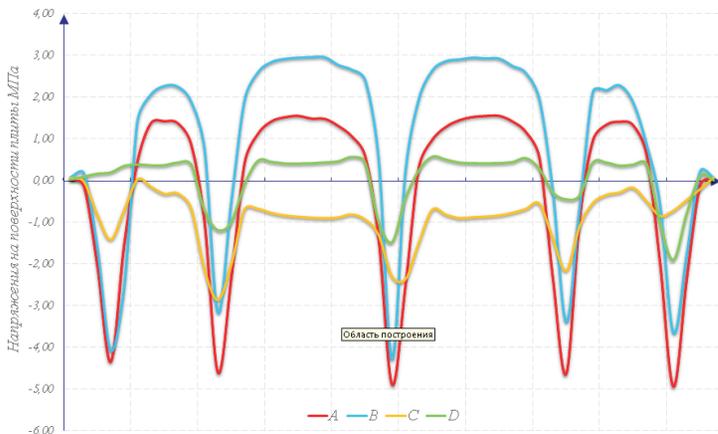
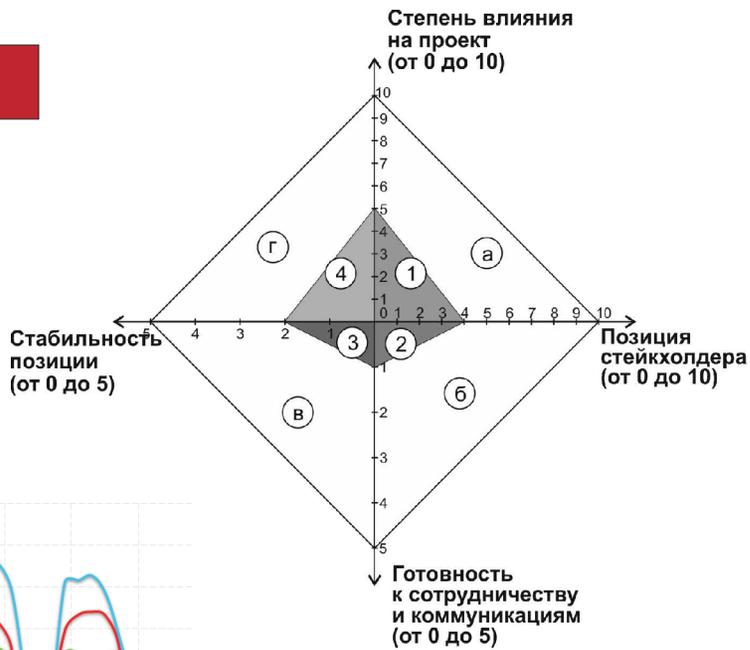


**КОНСТРУКЦИИ**

**МАТЕРИАЛЫ**

**МЕТОДЫ**





**Инженерно-строительный институт**  
**Центр дополнительных профессиональных программ**  
195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,  
тел/факс: 552-94-60, [www.stroikursi.spbstu.ru](http://www.stroikursi.spbstu.ru),  
[stroikursi@mail.ru](mailto:stroikursi@mail.ru)

**Приглашает специалистов организаций, вступающих в СРО,  
на курсы повышения квалификации (72 часа)**

Код	Наименование программы	Виды работ*
<b>Курсы по строительству</b>		
<b>БС-01-04</b>	«Безопасность и качество выполнения общестроительных работ»	п.1,2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14
<b>БС-01</b>	«Безопасность и качество выполнения геодезических, подготовительных и земляных работ, устройства оснований и фундаментов»	1,2,3,5
<b>БС-02</b>	«Безопасность и качество возведения бетонных и железобетонных конструкций»	6,7
<b>БС-03</b>	«Безопасность и качество возведения металлических, каменных и деревянных конструкций»	9,10,11
<b>БС-04</b>	«Безопасность и качество выполнения фасадных работ, устройства кровель, защиты строительных конструкций, трубопроводов и оборудования»	12,13,14
<b>БС-05</b>	«Безопасность и качество устройства инженерных сетей и систем»	15,16,17,18,19
<b>БС-06</b>	«Безопасность и качество устройства электрических сетей и линий связи»	20,21
<b>БС-08</b>	«Безопасность и качество выполнения монтажных и пусконаладочных работ»	23,24
<b>БС-12</b>	«Безопасность и качество устройства мостов, эстакад и путепроводов»	29
<b>БС-13</b>	«Безопасность и качество выполнения гидротехнических, водолазных работ»	30
<b>БС-14</b>	«Безопасность и качество устройства промышленных печей и дымовых труб»	31
<b>БС-15</b>	«Осуществление строительного контроля»	32
<b>БС-16</b>	«Организация строительства, реконструкции и капитального ремонта. Выполнение функций технического заказчика и генерального подрядчика»	33
<b>Курсы по проектированию</b>		
<b>БП-01</b>	«Разработка схемы планировочной организации земельного участка, архитектурных решений, мероприятий по обеспечению доступа маломобильных групп населения»	1,2,11
<b>БП-02</b>	«Разработка конструктивных и объемно-планировочных решений зданий и сооружений»	3
<b>БП-03</b>	«Проектирование внутренних сетей инженерно-технического обеспечения»	4
<b>БП-04</b>	«Проектирование наружных сетей инженерно-технического обеспечения»	5
<b>БП-05</b>	«Разработка технологических решений при проектировании зданий и сооружений»	6
<b>БП-06</b>	«Разработка специальных разделов проектной документации»	7
<b>БП-07</b>	«Разработка проектов организации строительства»	8
<b>БП-08</b>	«Проектные решения по охране окружающей среды»	9
<b>БП-09</b>	«Проектные решения по обеспечению пожарной безопасности»	10
<b>БП-10</b>	«Обследование строительных конструкций и грунтов основания зданий и сооружений»	12
<b>БП-11</b>	«Организация проектных работ. Выполнение функций генерального проектировщика»	13
<b>Э-01</b>	«Проведение энергетических обследований с целью повышения энергетической эффективности и энергосбережения»	
<b>Курсы по инженерным изысканиям</b>		
<b>И-01</b>	«Инженерно-геодезические изыскания в строительстве»	1
<b>И-02</b>	«Инженерно-геологические изыскания в строительстве»	2,5
<b>И-03</b>	«Инженерно-гидрометеорологические изыскания в строительстве»	3
<b>И-04</b>	«Инженерно-экологические изыскания в строительстве»	4
<b>И-05</b>	«Организация работ по инженерным изысканиям»	7

\*(согласно приказам Минрегионразвития РФ N 624 от 30 декабря 2009 г.)

**По окончании курса слушателю выдается удостоверение о краткосрочном повышении  
квалификации установленного образца (72 ак. часа)**

Для регистрации на курс необходимо выслать заявку на участие, и копию диплома об образовании по телефону/факсу: 8(812) 552-94-60, 535-79-92, , e-mail: [stroikursi@mail.ru](mailto:stroikursi@mail.ru).

[Http://www.engstroy.spb.ru](http://www.engstroy.spb.ru) – полнотекстовая версия журнала в сети Интернет. Бесплатный доступ, обновление с каждым новым выпуском

**Инженерно-строительный журнал**

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ISSN 2071-4726

Свидетельство о государственной регистрации: ПИ №ФС77-38070, выдано Роскомнадзором

Специализированный научный журнал. Выходит с 09.2008.

Включен в Перечень ведущих периодических изданий ВАК РФ

Периодичность: 8 раз в год

**Учредитель и издатель:**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**Адрес редакции:**

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 227А

**Главный редактор:**

Вера Михайловна Якубсон

**Научный редактор:**

Николай Иванович Ватин

**Литературный редактор:**

Екатерина Игоревна Архипова

**Редакционная коллегия:**

д.т.н., проф. В.В. Бабков;  
д.т.н., проф. М.И. Бальзанников;  
к.т.н., проф. А.И. Боровков;  
д.т.н., проф. Н.И. Ватин;  
PhD, professor M. Вельжкович;  
д.т.н., проф. А.Д. Гиргидов;  
д.т.н., проф. Э.К. Завадскас;  
D.Sc., professor M. Кнежевич;  
д.т.н., проф. В.В. Лалин;  
д.т.н., проф. Б.Е. Мельников;  
д.т.н., проф. Ф. Неправишта;  
д.т.н., проф. Р.Б. Орлович;  
Dr. Sc. Ing., professor Л. Пакрастиньш;  
Dr.-Ing. Habil., professor X. Пастернак;  
д.т.н., проф. А.В. Перельмутер;  
к.т.н. А.Н. Пономарев;  
д.ф.-м.н., проф. М.Х. Стрелец;  
д.т.н., проф. О.В. Тараканов;  
Dr.-Ing., professor Д. Унгерман.

Установочный тираж 1000 экз.

Подписано в печать 26.11.15.  
Формат 60x84/8, усл. печ. л. 10.  
Заказ №2774.

Отпечатано в типографии СПбПУ.  
СПб, ул. Политехническая, д. 29

**Содержание****МЕТОДЫ**

- Александров А.С., Калинин А.Л. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 1. Учет деформаций в условии пластичности Кулона – Мора 4
- Азарова И.Б. Основные аспекты ценностно-ориентированного управления инвестиционно-строительными жилищными проектами 18

**КОНСТРУКЦИИ**

- Морозов Н.М., Красникова Н.М., Боровских И.В. Факторы, влияющие на разрушение бетона дорожных плит 30
- Бабков В.В., Юмагулов Р.А., Кильдибаев Р.С. Напряженно-деформированное состояние дорожных плит в процессе производства и эксплуатации в условиях Западной Сибири 39

**МАТЕРИАЛЫ**

- Волкова А.А., Пайков А.В., Столяров О.Н., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Структура и свойства текстильно-армированного бетона 50
- Глазков С.С. Стабилизация торцевой паркетной шашки с использованием эпоксидной смолы 57
- Гайфуллин А.Р., Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. Влияние добавок глинистых в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня 66
- Аута С.М., Шивуа А.Д., Тсадо Т.Е. Прочность при сжатии бетона с золой лузги проса в качестве частичного заменителя портландцемента (англ.) 74

© ФГАОУ ВО СПбПУ, 2015

На обложке: иллюстрации авторов к статьям номера

**Контакты:**

Тел. +7(812)535-52-47 E-mail: [mce@ice.spbstu.ru](mailto:mce@ice.spbstu.ru)

Web: <http://www.engstroy.spb.ru>

[Http://www.engstroy.spb.ru](http://www.engstroy.spb.ru) – full-text open-access version in Internet. It is updated immediately with each new issue.

## Magazine of Civil Engineering

SCHOLAR JOURNAL

ISSN 2071-4726

Peer-reviewed scientific and technical journal

Start date: 2008/09

8 issues per year

### Publisher:

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

### Corresponding address:

227a Hydro Building, 29 Polytechnicheskaya st., Saint-Petersburg, 195251, Russia

### Editor-in-chief:

Vera M. Yakubson

### Science editor:

Nikolay I. Vatin

### Copy editor:

Ekaterina I. Arkhipova

### Editorial board:

V.V. Babkov, D.Sc., professor

M.I. Balzannikov, D.Sc., professor

A.I. Borovkov, PhD, professor

M. Veljkovic, PhD, professor

E.K. Zavadskas, D.Sc., professor

M. Knezevic, D.Sc., professor

V.V. Lalin, D.Sc., professor

B.E. Melnikov, D.Sc., professor

F. Nepravishita, D.Sc., assoc. professor

R.B. Orlovich, D.Sc., professor

L. Pakrastinsh, Dr.Sc.Ing., professor

H. Pasternak, Dr.-Ing.habil., professor

A.V. Perelmuter, D.Sc., professor

A.N. Ponomarev, PhD, professor

M.Kh. Strelets, D.Sc., professor

O.V. Tarakanov, D.Sc., professor

D. Ungermann, Dr.-Ing., professor

## Contents

### METHODS

- Aleksandrov A.S., Kalinin A.L. Improvement of shear strength design of a road structure. Part 1. Deformations in the Mohr – Coulomb plasticity condition (rus) 4
- Azarova I. The main aspects of the value-oriented management of investment and construction housing projects (rus) 18

### STRUCTURES

- Morozov N.M., Krasinikova N.M., Borovskikh I.V. Factors affecting the deterioration of concrete pavement slabs (rus) 30
- Babkov V.V., Yumagulov R.A., Kildibaev R.S. Stress and strain state of road slabs during production and use in the Western Siberia conditions (rus) 39

### MATERIALS

- Volkova A.A., Paykov A.V., Stolyarov O.N., Semenov S.G., Melnikov B.E. Structure and properties of textile reinforced concrete (rus) 50
- Glazkov S.S. Stabilizing parquet blocks with epoxy resin (rus) 57
- Gaifullin A.R., Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. The influence of clay additives in Portland cement on the compressive strength of the cement stone (rus) 66
- Auta S.M., Shiwua A.J., Tsado T.Y. Compressive strength of concrete with millet husk ash (MHA) as a partial replacement for cement 74

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. All rights reserved.

On the cover: authors' illustrations

+7(812) 535-52-47

E-mail: [mce@ice.spbstu.ru](mailto:mce@ice.spbstu.ru)

Web: [Http://www.engstroy.spb.ru](http://www.engstroy.spb.ru)



# ACUUS 2016

15<sup>th</sup> World Conference. Saint Petersburg

**12–15 сентября 2016 года**  
Россия | Санкт-Петербург

## 15-я Всемирная конференция

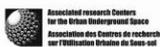
Объединения исследовательских центров  
подземного пространства мегаполисов

Ключевая тема конференции:

# Подземная урбанизация как необходимое условие устойчивого развития городов



От имени:



Объединение исследовательских  
центров подземного  
пространства мегаполисов

Организатор:



НП «Объединение  
подземных строителей»  
Тел.: +7 (812) 325 05 65

Оператор:



Компания «ПРИМЭКСПО»,  
в составе Группы компаний ITE  
Тел.: +7 (812) 380 60 05/00

Генеральный  
информационный  
отраслевой партнер:



info@acuus2016.com  
acuus2016.com

doi: 10.5862/MCE.59.1

## Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 1. Учет деформаций в условии пластичности Кулона – Мора

### Improvement of shear strength design of a road structure. Part 1. Deformations in the Mohr – Coulomb plasticity condition

*Канд. техн. наук, доцент А.С. Александров, аспирант А.Л. Калинин, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск, Россия*

*A.S. Aleksandrov, A.L. Kalinin, Siberian State Automobile And Highway Academy, Omsk, Russia*

**Ключевые слова:** критерий прочности; условие пластичности; деформация; трехосные испытания грунтов

**Key words:** strength criterion; plasticity condition; deformation; triaxial testing of soils

**Аннотация.** В статье выполнена модификация условия пластичности Кулона – Мора путем ввода третьего параметра, связанного с величиной осевой деформации образца, при которой в условиях трехосного сжатия формируются и прогрессируют площадки скольжения. Предложена относительная характеристика условий работы образца по сопротивлению сдвигу, определяемая отношением осевой деформации  $1$  к предельной  $1c$ , при которой определяются параметры предельной прямой Кулона – Мора. По данным трехосных испытаний установлено, что при значении относительной характеристики  $1/1c < 0.5$  образец работает в стадии уплотнения. При вариации этой характеристики в пределах  $0,5 \leq 1n/1c \leq 0.8$  происходит локализация деформаций вдоль площадок сдвига и развитие поверхностей скольжения, причем при  $1n/1c = 0.5$  площадки сдвига только зарождаются, а при  $1n/1c = 0.8$  – формируются окончательно. Для каждой величины характеристики  $1n/1c$ , наблюдаемой в процессе трехосного сжатия образца, определены значения параметра  $d$  и составлены выборки их частных значений. В результате статистической обработки определены границы доверительных интервалов варьирования параметра  $d$  и выполнено их математическое моделирование.

**Abstract.** The article presents the Mohr – Coulomb plasticity condition modified by incorporating a third parameter depending on sample axial deformation value for which sliding planes are formed and developed under triaxial compression. A relative characteristic of a sample's work under shear strength is offered; it is determined by the ratio of the axial strain  $1$  to the ultimate strain  $1c$  for which the parameters of the Mohr – Coulomb failure envelope are defined. Based on the triaxial test data it was established that for  $1/1c < 0.5$  the sample is in the stage of consolidation. For  $0.5 \leq 1n/1c \leq 0.8$ , deformations are localized along the shear planes and sliding surfaces are formed. It should be noted that for  $1n/1c = 0.5$ , the formation of shear planes only begins, and for  $1n/1c = 0.8$ , they are completely formed. Values of the  $d$  parameter are defined and samples of their particular values are drawn for each  $1n/1c$  value during the triaxial compression. Due to the statistical processing of the data the confidence limits of the  $d$  parameter variation were determined and their mathematical simulation was performed.

### Введение

Сопротивление грунтов и дискретных материалов сдвигу обуславливает величину пластических деформаций, накапливаемых земляным полотном и слоями дорожной одежды. Слои из дискретных материалов копируют неровности земляного полотна (рис. 1), а также приобретают свои пластические деформации. Эти дефекты копируются покрытием дорожной одежды (рис. 2).

Учитывая влияние сопротивления грунтов и дискретных материалов сдвигу на величину накапливаемых остаточных деформаций и ровности дорожных покрытий, отметим, что работы, направленные на совершенствование методов расчета дорожных одежд, актуальны. Авторы предприняли попытку модификации общепринятого метода расчета, которая заключается в последовательном решении серии задач.

Александров А.С., Калинин А.Л. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 1. Учет деформаций в условии пластичности Кулона – Мора



**Рисунок 1. Копирование деформации земляного полотна (нижний слой) песчаным дополнительным слоем основания (верхний слой) (дорожная одежда улицы 24-я Северная, г. Омск)**



**Рисунок 2. Копирование деформации основания тонкослойным покрытием (дорожная одежда кольцевого стенда Нантского университета) [1]**

### Обзор литературы

Расчет по сопротивлению сдвигу грунтов земляного полотна и дополнительных песчаных слоев оснований в РФ применяется с 1972 г. Он базируется на исследовании А.М. Кривисского<sup>1</sup> и созданном на его основе методе проектирования дорожной одежды. В основе расчета лежит критерий Кулона – Мора, который применяется как для грунтов, так и для зернистых материалов [2]. Специалисты дорожной отрасли предпринимали попытки совершенствования этого расчета различными путями.

1. Ввод новых и уточнение имеющихся в критериях нормативных документов коэффициентов, учитывающих отличия расчетной схемы от реальных условий работы грунта: Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46–83. (Взамен ВСН 46–72). Это касается условий работы слоев на контакте, воздействия динамической нагрузки и т.п.

2. Учет влияния повторности приложений нагрузок от транспортных средств на величину параметров грунта в условии Кулона – Мора  $c_N$  и  $\varphi_N$  [3, 4].

3. Уточнение границ дорожно-климатических зон и влажности грунтов в них, что позволяет более корректно принимать нормативные значения сцепления и угла внутреннего трения  $c$  и  $\varphi$  [5, 6].

4. Изучение влияния на влажность связных грунтов конструктивных особенностей дорожной одежды, в результате чего внесены поправки в действующий норматив – ОДН 218–046–01. Проектирование нежестких дорожных одежд (взамен ВСН 46–83).

Наряду с перечисленными направлениями отметим исследования влияния порового давления на величину эффективных напряжений, а также эффективных значений сцепления и угла внутреннего трения, применяемых в расчетах оснований фундаментов [7–9], дорожных одежд и грунтов земляного полотна [10, 11].

Объем работы, выполненной специалистами дорожной отрасли по модификации расчета по сопротивлению сдвигу, можно показать, записав критерий по ВСН 46–72 и ОДН 218.046–01:

$$\tau_{ан} + \tau_{ав} \leq K \cdot c; K = \frac{k_1 \cdot k_2}{n \cdot m} \cdot \frac{1}{K_{пр}}, \quad (1)$$

где  $\tau_{ан}$  – активное напряжение сдвига от транспортной нагрузки, МПа;  $\tau_{ав}$  – то же от собственного веса грунта, МПа;  $K$  – комплексный коэффициент;  $k_1$  – коэффициент, учитывающий снижение величины нормативного сопротивления сдвигу в результате воздействия повторных нагрузок от движения;  $k_2$  – коэффициент запаса на возможные отклонения от расчетных условий;

<sup>1</sup> Кривисский А.М. Принципы назначения конструкций дорожных одежд нежесткого типа на магистральных автомобильных дорогах : автореф. ... д-ра техн. наук. Л.: ЛИСИ, 1963. 31 с.

$n$  – коэффициент перегрузки;  $m$  – коэффициент, учитывающий отклонение условий взаимодействия слоев на контакте от принятой расчетной схемы;  $K_{пр}$  – коэффициент прочности;

$$\tau_{ан} \leq \frac{c_N \cdot k_d + \gamma_{ср} \cdot z_{оп} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{ст}}{K_{пр}}, \quad (2)$$

где  $c_N$  – сцепление, МПа;  $k_d$  – коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе песчаного слоя с нижним слоем несущего основания;  $\gamma_{ср}$  – средневзвешенный удельный вес конструктивных слоев, расположенных выше проверяемого слоя, МН/см<sup>3</sup>;  $z_{оп}$  – глубина расположения поверхности слоя, проверяемого на сопротивление сдвигу, см;  $\varphi_{ст}$  – значение угла внутреннего трения при однократном воздействии статической длительной нагрузки, °.

В зависимостях (1) и (2) величина касательного напряжения  $\tau_{ан}$  определяется из условия Кулона – Мора, но при различных значениях угла внутреннего трения. Эти формулы имеют вид

$$\tau_{ан} = \frac{1}{\cos \varphi} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения, °;  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – максимальное и минимальное главные напряжения, возникающие в сечении по оси симметрии нагрузки, распределенной по круглой площадке, МПа.

В условиях воздействия многократно прикладываемой нагрузки величина параметров предельной прямой Кулона – Мора уменьшается по мере увеличения числа приложенных нагрузок. В этом случае при расчете касательного напряжения по формуле (3) величину угла внутреннего трения  $\varphi$  необходимо заменить меньшим значением  $\varphi_N$ , соответствующим количеству реализованных нагрузок.

Так как при увеличении числа приложенных нагрузок величина  $\varphi_N$  уменьшается, то касательные напряжения, вычисляемые по формуле (3), увеличиваются. Из анализа критериев (1) и (2) следует, что при прочих равных условиях и  $N > 1 > c_N$ , в результате чего предельное сопротивление грунта сдвигу, зависящее от величины сцепления, в современных расчетах меньше, чем в ранее действующих инструкциях. Отсюда следует, что многолетняя модификация расчета по сопротивлению сдвигу привела специалистов дорожной отрасли к пониманию необходимости ужесточения условия пластичности Кулона – Мора, что выполнено путем уменьшения параметров предельной прямой Кулона – Мора.

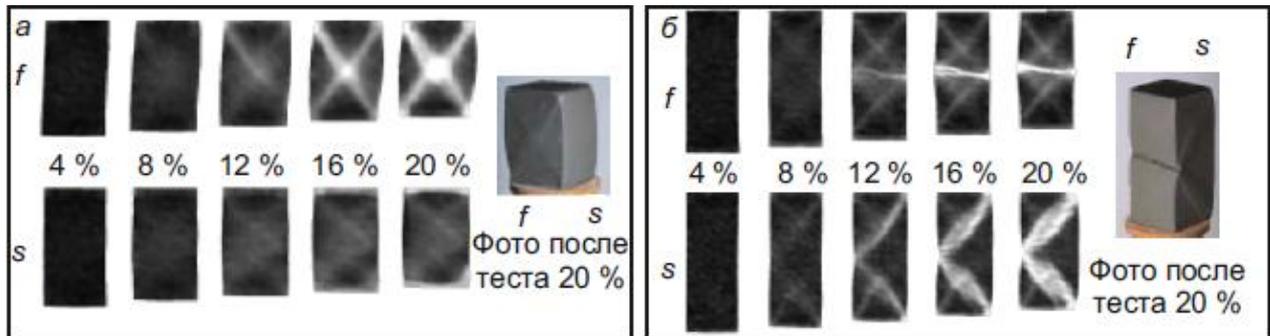
Эффекта увеличения касательных напряжений можно добиться заменой критерия Кулона – Мора другим более жестким условием пластичности. Необходимость такой замены подтверждается данными экспериментов.

Во-первых, параметры предельной прямой Кулона – Мора определяются по данным трехосных испытаний. Условием отказа образца считается его разрушение или деформирование до предельной величины  $\varepsilon_1 = 15\%$  в РФ или  $\varepsilon_1 = 20\%$  в США и странах Евросоюза. Это значит, что если в элементе дорожной конструкции возникнет зона с предельным состоянием по критерию Кулона – Мора глубиной распространения 10 см, то она претерпит деформации величиной 15...20 мм. Такие деформации превышают предельные значения продольных неровностей и допускаемую глубину колеи.

Во-вторых, физическая природа появления площадок скольжения объясняется экспериментальными данными и состоит в том, что по линиям будущего сдвига происходит локализация деформаций [12]. В процессе воздействия нагрузки деформации накапливаются и проявляются в виде линии толщиной приблизительно в 10 зерен [13]. Р. Хиллом [14], а затем Дж. Райсом [15] теоретически показано, что формирование зон локализации деформации происходит в результате ветвления трещины и ее последующего двоения. Из этого следует, что от каждого края штампа на плоскости образца формируется не одна площадка скольжения, а как минимум две.

Эксперименты японских коллег показали, что площадки скольжения в грунтовом образце, изготовленном в форме параллелепипеда, зарождаются при деформации  $\varepsilon_1 = 8\%$  и развиваются в ходе деформирования до величины  $\varepsilon_1 = 12\%$  [16, 17]. При деформации образца  $\varepsilon_1 = 12\%$  площадки скольжения сформированы окончательно. В этом эксперименте были изготовлены прямоугольные образцы из глины с влажностью на границе текучести  $W_7 = 0.62$ , числом пластичности  $I_p = 0.33$  и плотностью  $\rho = 2.69 \text{ г/см}^3$ . Поверх резиновой оболочки образца была Александров А.С., Калинин А.Л. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 1. Учет деформаций в условии пластичности Кулона – Мора

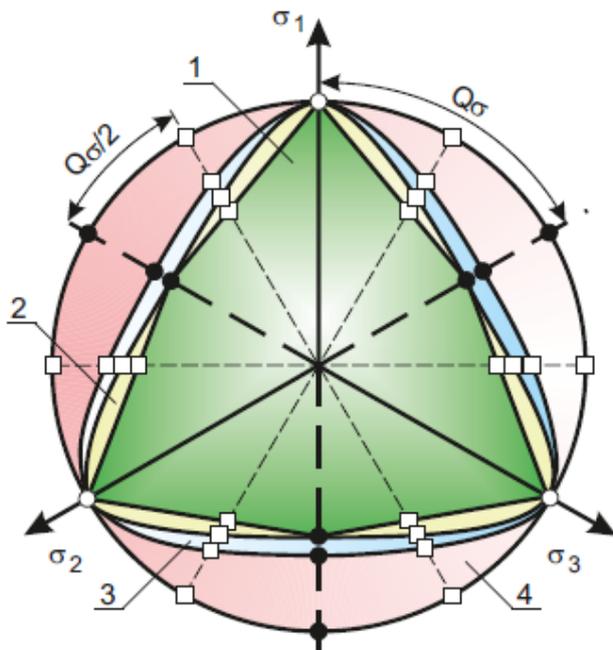
нанесена сетка с квадратными ячейками 2 мм. Перед испытанием для определения начального местоположения узлов сетки с двух сторон образца, поверхность которых условно обозначена  $f$  и  $s$  (рис. 3), была произведена видеосъемка [17].



**Рисунок 3. Локализация деформаций и площадок скольжения при трехосных испытаниях со скоростью 1 %/мин прямоугольных образцов с размерами: а) 4×4×8 см; б) 4×4×12 см [16, 17]**

Такая же видеосъемка производилась в период испытаний при вертикальной деформации образца, соответствующей 4, 8, 12, 16 и 20 % [16, 17] (рис. 3). В результате установлено, что начало локализации деформаций имеет место при вертикальной деформации 8 %, а при деформировании образца до 12 % от каждого угла прямоугольного образца формируются четыре площадки сдвига, которые являются предшественником последующего разрушения [16, 17]. К окончанию испытания на одной поверхности образца отчетливо проявлялись две площадки скольжения (рис. 3), каждая из которых проходит от своего края штампа по диагонали через весь образец.

Таким образом, предельные деформации образца целесообразно принимать в пределах  $\varepsilon_1 = 8...12$  %. Однако определение параметров предельной прямой Кулона – Мора при таких деформациях требует пересмотра нормативных значений сцепления и угла внутреннего трения, то есть изменения всего банка данных.



**Рисунок 4. Критерии в девиаторном плане [23, с. 798]: 1 – Кулона – Мора; 2 – Матцуока – Накаи; 3 – Ладе – Дункана; 4 – Друкера – Прагера при аппроксимации по углам сжатия поверхности Мора**

Учитывая, что при расчете грунтов земляного полотна по условию сопротивления сдвигу рассматривают напряженное состояние, характеризуемое главными напряжениями  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ , параметр Лоде и угол Лоде соответственно равны  $\mu_\sigma = -1$  и  $\Theta_\sigma = 60^\circ$ . Такое напряженное состояние рассматривается в работе Aleksandrov A.S., Kalinin A.L. Improvement of shear strength design of a road structure. Part 1. Deformations in the Mohr – Coulomb plasticity condition

Поэтому нами рассмотрена возможность замены условия пластичности Кулона – Мора одним из аналитических критериев: Друкера – Прагера [18], Ладе [19], Ладе – Дункана [20], Матцуока – Накаи [21, 22].

На рисунке 4 в девиаторном плане приведено сравнение критериев Кулона – Мора, Ладе – Дункана, Матцуока – Накаи и Друкера – Прагера, аппроксимирующих шестигранник Мора по углам сжатия.

На этом рисунке приведены площадки чистого сдвига, на которых результаты всех критериев различны. Местоположение площадок соответствует значению угла Лоде  $\Theta_\sigma = 0^\circ$ . Наиболее близкие результаты к критерию Кулона – Мора дает условие Матцуока – Накаи, затем критерий Ладе – Дункана, а наибольшая разница имеет место при применении условия Друкера – Прагера.

состояние является трехосным сжатием, для которого предельное состояние всеми критериями, представленными на рисунке 4, описывается одинаково. Поэтому при расчете дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу в грунте земляного полотна или песчаном дополнительном слое применение этих условий пластичности приводит к одинаковым результатам.

Вследствие этого модификация критерия Кулона – Мора представляется авторам перспективным направлением. Одним из вариантов такой модификации является эмпирический критерий Г.К. Арнольда. Для демонстрации этого критерия вначале приведем классическое условие Кулона – Мора, записанное в другой по сравнению с выражениями (1)–(3) форме. В соответствии с этой записью предельное состояние по условию Кулона – Мора описывается уравнением

$$\sigma_1 \cdot \left( -\sin \varphi \right) - \sigma_3 \cdot \left( +\sin \varphi \right) = 2 \cdot c \cdot \cos \varphi. \quad (4)$$

Из этого критерия для зоны с активным ренкиновским состоянием<sup>2</sup> определение предельной величины главного напряжения  $\sigma_{3пр}$  выполняется по формуле:

$$\sigma_{3пр} = \sigma_1 \cdot K_{акт} - 2 \cdot c \cdot \sqrt{K_{акт}}; \quad K_{акт} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}, \quad (5)$$

где  $K_{акт}$  – функция угла внутреннего трения для активного ренкиновского состояния.

Г.К. Арнольд, выполнив анализ результатов трехосных испытаний, пришел к выводу, что предельное состояние наступает при несколько меньшей величине максимального главного напряжения, чем это следует из условия Кулона – Мора [24]. Вследствие этого предельная величина удерживающего напряжения  $\sigma_3$  должна быть выше, чем это следует из формулы (6). Учитывая эти обстоятельства, Г.К. Арнольд формулу (5) приводит в следующем виде [24]:

$$\sigma_{3пр} = \sigma_1 \cdot K_{акт} - 2 \cdot c \cdot K_{акт}. \quad (6)$$

Если формулы (5) и (6) записать в виде уравнений предельного состояния, оставив в правой части только сцепление, то получим:

$$\frac{1}{2} \cdot \left( \sigma_1 \cdot \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - \sigma_3 \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \right) = c, \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \left( \sigma_1 - \sigma_3 \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) = c. \quad (8)$$

Уравнение (7) определяет предельное состояние по оригинальному условию Кулона – Мора, оно дает тождественные с другими формами записи этого критерия результаты. Уравнение (8) авторы называют критерием Г.К. Арнольда. В исследовании [24] оно не приводится, но напрямую вытекает из формулы (6), принадлежащей Г.К. Арнольду. Этот критерий следует считать эмпирической модификацией условия Кулона – Мора. Уравнение предельного состояния в форме (8) принято Г.В. Долгих, и после применения теории линейно деформированной среды получена формула для расчета безопасных давлений [25]. В работе [26] применен иной путь модификации различных условий пластичности, в соответствии с которым выполняется поиск формул, связывающих пределы прочности на сжатие и растяжение с параметрами предельной прямой Кулона – Мора. Полученные формулы подставляют в критерии прочности твердых тел. В результате этой процедуры в модифицированных критериях параметрами материала являются сцепление и угол внутреннего трения.

По мнению авторов, такой способ модификации представляет интерес, но получаемые при его реализации критерии не связаны с деформациями образца и не описывают кинетику формирования площадок скольжения (см. рис. 3).

<sup>2</sup> Областью с активным ренкиновским состоянием называют зону, в которой грунт в поперечном направлении расширяется, а областью с пассивным ренкиновским состоянием – в которой грунт в поперечном направлении сжимается.

Александров А.С., Калинин А.Л. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 1. Учет деформаций в условии пластичности Кулона – Мора

### Постановка цели и задач

Выполненный обзор и анализ работ предшественников позволяет поставить цель и задачи публикации.

Целью работы является совершенствование метода расчета грунтов земляного полотна и дискретных слоев дорожной одежды по сопротивлению сдвигу.

Поставленная цель требует решения серии задач, которые вряд ли возможно привести в одной статье. Поэтому в публикации решается первая, но очень важная задача, связанная с обоснованием условия пластичности, закладываемого в основу расчета. Достоверность такого условия во многом обуславливает адекватность расчета в целом. В связи с этим задачами статьи являются:

- модификация условия пластичности Кулона – Мора путем ввода третьего параметра, учитывающего величину деформаций образца в условиях трехосного сжатия;
- экспериментальные исследования деформируемости грунтов в условиях трехосного сжатия и определение зависимости величины введенного в критерий Кулона – Мора параметра от осевой деформации образца.

### Материалы исследования

Приступая к модификации условия пластичности, покажем, что подстановка в оригинальный критерий прочности твердого тела Мора зависимостей, связывающих пределы прочности с углом внутреннего трения и сцепления, приводит к условию Кулона – Мора, применяемому в расчетах по сопротивлению сдвигу.

Известно, что оригинальный критерий Мора для твердого тела записывается в следующих видах:

- при растяжении

$$\sigma_1 - k_{Mp} \cdot \sigma_3 = R_p; \quad k_{Mp} = R_p / R_c; \quad (9)$$

- при сжатии

$$\sigma_1 - k_{Mc} \cdot \sigma_3 = R_c; \quad k_{Mc} = R_c / R_p. \quad (10)$$

Пределы прочности определяются по известным формулам:

$$R_c = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}; \quad (11)$$

$$R_p = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}. \quad (12)$$

Подставив в условие (10) выражения (11) и (12), получим уравнение

$$\sigma_1 - \sigma_3 \cdot \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (13)$$

Преобразуя уравнение (13), получим уравнение предельного состояния (4).

Если в формуле (4) раскрыть скобки и определенным образом выполнить группировку членов, включающих в себя главные напряжения, то после преобразований получим

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cdot \cos \varphi} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \cdot \tan \varphi = c. \quad (14)$$

Уравнение (14) является оригинальным условием Кулона – Мора в традиционной для специалистов дорожной отрасли форме.

Пределы прочности на сжатие и растяжение можно определить по формулам, тождественным зависимостям (11) и (12), а именно

$$R_c = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = 2 \cdot c \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}}; \quad (15)$$

$$R_p = \frac{2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} = 2 \cdot c \cdot \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}}. \quad (16)$$

Введя в эти зависимости параметр  $d$ , получим:

$$R_c = 2 \cdot c \cdot \left( \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^{2 \cdot d} = 2 \cdot c \cdot \left( \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d; \quad (17)$$

$$R_p = 2 \cdot c \cdot \left( \frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^{2 \cdot d} = 2 \cdot c \cdot \left( \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d. \quad (18)$$

Из анализа формул (17) и (18) следует, что в зависимости от величины  $d$  сопротивления сжатию и растяжению имеют диапазон варьирования, границами которого являются пределы прочности третьей теории  $R_c = R_p = 2 \cdot c$  и гипотезы Мора, определяемые по выражениям (15) и (16).

Подставив в критерий Мора для сжатия (10) зависимости (17) и (18), получим

$$\frac{1}{2} \cdot \left( \sigma_1 \cdot \left( \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^d - \left( \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d \cdot \sigma_3 \right) = c. \quad (19)$$

При  $d = 0.5$  уравнение (19) приобретает вид тождества (7), то есть становится критерием Кулона – Мора. При  $d = 0$  зависимость (19) превращается в третью теорию прочности, уравнение предельного состояния которой дается в виде

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2 \cdot c_u, \quad (20)$$

где  $c_u$  – сопротивление недренированному сдвигу, кПа, являющееся аналогом сцепления, но определяемое по данным неконсолидированных недренированных трехосных испытаний, при которых  $\varphi = 0$ .

Решив уравнение предельного состояния (19) относительно величины  $\sigma_1$ , получим формулу для определения ее предельного значения  $\sigma_{1пр}$ :

$$\sigma_{1пр} = 2 \cdot c \cdot \left( \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^d + \left( \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^{2 \cdot d} \cdot \sigma_3. \quad (21)$$

Из анализа зависимости (21) следует, что:

- при  $d = 0$  это уравнение приобретает вид третьей теории прочности

$$\sigma_{1пр} = 2 \cdot c + \sigma_3; \quad (22)$$

- при  $d = 0,5$  это уравнение приобретает вид теории Кулона – Мора

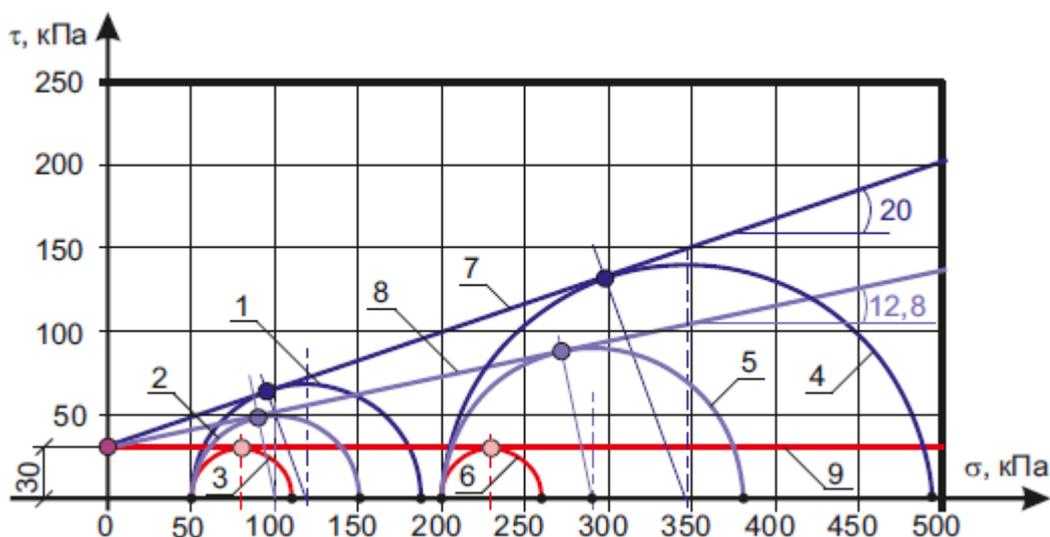
$$\sigma_{1пр} = 2 \cdot c \cdot \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \cdot \sigma_3. \quad (23)$$

Сравнивая зависимости (21)–(23), отметим, что вычисляемая по формуле (21) предельная величина максимального главного напряжения при любой величине параметра  $d$ , варьирующегося в диапазоне  $0 < d < 0.5$ , больше, чем по формуле (22), и меньше, чем по выражению (23). Отсюда следует, что каждой величине  $d$  соответствует индивидуальное семейство кругов предельных напряжений. В таблице 1 приведены вычисленные для заданных значений  $\sigma_3$  параметры предельных кругов Мора.

**Таблица 1. Параметры кругов предельных напряжений при различной величине параметра  $d$  и минимальных главных напряжениях  $\sigma_3$**

Характеристика		Величина			
Напряжение $\sigma_3$ , кПа		50	100	150	200
Угол внутреннего трения $\varphi$ , град		20	20	20	20
Сцепление $c$ , кПа		30	30	30	30
Предельная величина максимального главного напряжения, вычисленная по формуле (21), кПа, при значениях $d$	$d=0,5$	187.669	289.650	391.630	493.610
	$d=0,4$	168.225	256.657	345.089	433.520
	$d=0,3$	150.987	227.670	304.353	381.036
	$d=0,2$	135.688	202.183	268.678	335.172
	$d=0,1$	122.093	179.754	237.414	295.075
	$d=0$	110	160	210	260
Радиус кругов предельных напряжений, кПа, при значениях $d$	$d=0,5$	68.835	94.825	120.815	146.805
	$d=0,4$	59.113	78.329	97.545	116.760
	$d=0,3$	50.494	63.835	77.177	90.518
	$d=0,2$	42.844	51.092	59.339	67.586
	$d=0,1$	36.047	39.877	43.707	47.538
	$d=0$	30	30	30	30
Абсцисса центра кругов предельных напряжений, кПа, при значениях $d$	$d=0,5$	118.835	194.825	270.815	346.805
	$d=0,4$	109.113	178.329	247.545	316.760
	$d=0,3$	100.494	163.835	227.177	290.518
	$d=0,2$	92.844	151.092	209.339	267.586
	$d=0,1$	86.047	139.877	193.707	247.538
	$d=0$	80	130	180	230

На рисунке 5 приведены построенные по данным таблицы 1 круги предельных напряжений.



**Рисунок 5. Круги предельных напряжений по данным таблицы 1:  
1–3 – при  $\sigma_3 = 50$  кПа и  $d = 0.5, 0.3$  и  $0$ ; 4–6 – при  $\sigma_3 = 200$  кПа и  $d = 0.5, 0.3$  и  $0$ ;  
7–9 – предельные прямые оригинального условия пластичности Кулона – Мора, соответствующие предлагаемому критерию (19) при параметре  $d$ , равном  $0.5, 0.3$  и  $0$  соответственно**

Из анализа данных таблицы 1 и рисунка 5 следует, что в уравнении предельного состояния (19) каждой величине параметра  $d$  соответствует пара кругов предельных напряжений. Например, круги 1 и 4 соответствуют  $d = 0.5$ , а круги 2 и 5 построены при  $d = 0.3$  и т. д. При этом условие (19) постулирует постоянство сцепления, то есть  $c = \text{const}$  для всех кругов Мора. Это наглядно представлено на рисунке 5, а также данными таблицы 1, в соответствии с которыми радиус круга Мора при  $d = 0$  равен сцеплению. На рисунке 5 к кругам предельных напряжений проведены предельные прямые, которые являются оригинальным критерием Кулона – Мора. Из анализа этих прямых следует, что угловая координата в уравнениях прямых изменяется от величины, соответствующей углу внутреннего трения Кулона– Мора, при  $d = 0,5$  до  $\varphi = 0$  при  $d = 0$ . Отсюда следует, что параметр  $d$  в уравнении предельного равновесия (21) регулирует размеры круга предельных напряжений и угол наклона касательной к ним в условии пластичности Кулона–Мора. При вариации параметра  $d$  в диапазоне  $0 < d < 0.5$  все предельные поверхности заключены между шестигранниками Треска (случай  $d = 0$ ) и Мора (случай  $d = 0.5$ ). Таким образом, условие пластичности (19) является мультиповерхностным критерием. Если уравнение (19) модифицировать вводом угла Лоде, то можно построить мультиповерхностное условие пластичности, которое применимо при любых напряженных состояниях. Однако вследствие того, что при расчетах дорожных конструкций принято напряженное состояние, характеризуемое напряжениями  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ , то уравнения (19) вполне достаточно так, как оно описывает именно это напряженное состояние.

Для определения связи параметра  $d$ , входящего в рекомендуемое условие (19), с величиной предельной деформации авторами выполнены трехосные испытания суглинка легкого. При планировании эксперимента учитывалась необходимость определения сцепления и угла внутреннего трения, что требует выполнения консолидированных недренированных (КН) испытаний до разрушения образца или его деформирования до величины 15 %.

Для определения параметра  $d$  в условии (19) необходимо рассматривать величину главных напряжений, при которых формируются и развиваются площадки скольжения. Образцы грунта изготовлены из суглинка легкого путем трамбования в приборе стандартного уплотнения (ПСУ) при влажности, близкой к оптимальной. Из каждого образца, изготовленного в ПСУ, отобрано три пробы, которые испытывались в камере трехосного сжатия измерительно-вычислительного комплекса АСИС-1. При испытаниях выяснилось, что часть проб разрушилась при деформациях меньше 15 %. Это означает, что в этих образцах площадки скольжения появились и развивались при меньшей осевой деформации, чем зафиксировано в работах [16, 17]. Поэтому авторами сделан вывод, что наряду с характеристиками моментов начала и окончания формирования площадок скольжения по величине осевой деформации следует рассматривать относительную характеристику, определяемую отношением этих деформаций к предельной деформации, фиксируемой при отказе образца. Если деформации, соответствующие началу  $\varepsilon_{1н} = 8\%$  и окончанию  $\varepsilon_{1к} = 12\%$  формирования площадок сдвига, разделить на предельную деформацию  $\varepsilon_{1с} = 15\%$ , то получим  $\varepsilon_{1н}/\varepsilon_{1с} \approx 0.5$  и  $\varepsilon_{1к}/\varepsilon_{1с} = 0.8$  соответственно. Используя эти относительные показатели, авторы классифицируют условия работы образцов из глинистого грунта по локализации пластических деформаций вдоль площадок сдвига (табл. 2).

**Таблица 2. Условия работы образца глинистого грунта в различных диапазонах варьирования осевой деформации при трехосном сжатии**

Варьирование деформации $\varepsilon_1$ , доли от предельной $\varepsilon_{1с}$	$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1с}} < 0.5$	$0,5 \leq \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1с}} \leq 0.8$	$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1с}} > 0.8$
Условия работы образца	Преимущественно уплотнение, локализация пластических деформаций отсутствует	Сдвиг, локализация пластических деформаций вдоль площадок скольжения	Преимущественно пластическое течение с последующим отказом

В таблице 3 приведены результаты испытаний, включающие экспериментальные значения максимальных главных напряжений, соответствующие различным отношениям деформаций  $\varepsilon_1/\varepsilon_{1с}$ .

**Таблица 3. Экспериментальные отношения деформаций  $\varepsilon_1/\varepsilon_{1c}$  и соответствующие им значения напряжений  $\sigma_1$**

№ образца	Показатели физических свойств		Показатели сопротивления сдвигу и $\sigma_3$ по данным КН испытаний			Экспериментальные значения $\sigma_1$ при $\varepsilon_1/\varepsilon_{1c}$			
	$W/W_T$	$k_y$	$\sigma_3$ , кПа	$c$ , кПа	$\varphi$ , град	0,5	0,6	0,7	0,8
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.523	0.99	200	22	19	381	417	453	475
2			250			464	507	550	569
3			300			440	467	493	520
4	0.53	0.995	150	15	25	345	381	406	434
5			200			392	427	461	485
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	0.54	0.99	50	19	26	157	178	198	215
7			100			228	250	264	276
8			150			331	362	388	406
9	0.55	0.98	100	24	27	298	326	354	370
10			150			381	428	465	492
11			200			403	440	478	516
12	0.56	0.973	100	22	28	297	332	355	371
13			150			377	426	475	507
14			200			413	457	500	544
15	0.563	0.373	100	24	20	231	252	272	291
16			125			298	323	345	365
17			175			325	350	371	388
18	0.573	0.986	100	15	10	162	173	184	193
19			150			223	234	245	254
20			200			279	289	298	306
21	0.58	0.995	100	15	10	156	166	175	181
22			150			228	239	250	258
23			200			280	292	305	317
24	0.67	0.99	75	30	20	187	208	230	246
25			125			256	282	307	329
26			175			286	306	326	347
27	0.683	0.99	225	17	17	326	348	369	391
28			275			399	420	441	462
29			325			442	461	481	500

Примечание.  $W$  – влажность грунта;  $W_T$  – влажность грунта на границе текучести;  $W/W_T$  – относительная влажность грунта;  $k_y$  – коэффициент уплотнения.

При статистической обработке результатов испытаний сформировано 8 выборок, которые разделены по относительной влажности и характеристики  $\varepsilon_1/\varepsilon_{1c}$ . В первую очередь каждая выборка проверена на наличие грубых ошибок. Было отмечено, что при вариации отношений деформаций  $0,5 \leq \varepsilon_1/\varepsilon_{1c} \leq 0,8$  частные значения параметра  $d$  и их статистики существенно разнятся, а при вариации относительной влажности отличие частных значений параметра  $d$  не столь велико. Поэтому каждую из двух выборок, составленных для различных диапазонов относительных влажностей, проверили на принадлежность одной генеральной совокупности. Оценка выборок выполнена с привлечением критериев Фишера  $F$  и Стьюдента  $t$ , значения которых даны в таблице 5.

Таблица 5. Оценка выборок на принадлежность одной генеральной совокупности

Статистика	Отношение деформаций $\varepsilon_1/\varepsilon_{1c}$			
	0.5	0.6	0.7	0.8
$F=S_{d2}/S_{d1}$	1.489	1.687	1.974	2.096
$F_a$	2.64	2.64	2.64	2.64
$F < F_a$	Выполняется	Выполняется	Выполняется	Выполняется
$t$	0.758	0.751	0.680	0.696
$t_a$	2.05	2.05	2.05	2.05
$t < t_a$	Выполняется	Выполняется	Выполняется	Выполняется
<b>Вывод</b>	<b>Вследствие выполнения условий F-критерия и t-критерия выборки попарно могут быть объединены в одну генеральную совокупность</b>			

Критерии Фишера и Стьюдента показали, что по величине относительной влажности выборки параметров  $d$  целесообразно объединить в 4 выборки, статистики которых приведены в таблице 6.

Таблица 6. Результаты определения математического ожидания  $d_{cp}$  и расчетных значений  $d_{min}$  и  $d_{max}$  параметра  $d$ 

Статистика	Отношение деформаций $\varepsilon_1/\varepsilon_{1c}$			
	0.5	0.6	0.7	0.8
<b>Статистики новых выборок после попарного объединения</b>				
$d_{cp}$	0.314	0.372	0.420	0.459
$S_d$	0.050	0.053	0.050	0.046
$V, \%$	16.03	14.17	11.95	9.94
$d_{min}$	0.295	0.352	0.401	0.442
$d_{max}$	0.333	0.392	0.439	0.477

Статистические значения параметра  $d$  в зависимости от относительной характеристики  $\varepsilon_1/\varepsilon_{1c}$  аппроксимированы формулами

$$d_{cp} = 1.2988 \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1c}} - 0.6486 \cdot \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1c}} \right)^2 - 0.1728 ; \quad (24)$$

$$d_{max} = 1.3689 \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1c}} - 0.6882 \cdot \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1c}} \right)^2 - 0.1807 ; \quad (25)$$

$$d_{min} = 1.2287 \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1c}} - 0.609 \cdot \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1c}} \right)^2 - 0.165 . \quad (26)$$

Авторы отмечают, что с появлением экспериментальных данных о величине параметра  $d$  при более высоких влажностях грунта появятся дополнительные выборки. Оценка наших выборок и новых дополнительных может показать невозможность их объединения в одну генеральную совокупность. В этом случае величина параметра  $d$  должна будет варьироваться как в зависимости от отношений деформаций  $\varepsilon_1/\varepsilon_{1c}$ , так и по величине относительной влажности, а формулы (24)–(26) будут доработаны до двухпараметрических математических моделей.

Из анализа зависимостей (24)–(26) следует, что параметр  $d$  связан с отношением деформации  $\varepsilon_1$ , которая может быть принята в качестве условной меры начала пластичности, к предельной деформации  $\varepsilon_{1c}$ , при которой определяются параметры Кулона – Мора.

Из анализа данных таблицы 6 следует, что начало формирования площадок сдвига имеет место при относительной характеристике  $\varepsilon_1/\varepsilon_{1c} = 0.5$ , которой соответствует диапазон варьирования истинного значения параметра  $d$  в пределах 0.295...0.333. Так как условие (19) принимает вид третьей теории прочности при  $d = 0$ , то это условие, как и ряд предельных состояний по критерию (19) при  $0 < d < 0.295$ , в расчетах использовать нецелесообразно. Поэтому можно по аналогии с выводом условия (19) предложить другой вариант, связывающий Александров А.С., Калинин А.Л. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 1. Учет деформаций в условии пластичности Кулона – Мора

эмпирический (8) и оригинальный критерии Кулона – Мора в форме (7). Для этого предел прочности на сжатие представим формулой (17), в которой параметр  $d$  обозначим латинской  $b$ , а предел прочности на растяжение определим по формуле

$$R_p = 2 \cdot c \cdot \left( \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^b \cdot \left( \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right), \quad (27)$$

где  $b$  – параметр, аналогичный рассмотренному авторами параметру  $d$ , введенный вследствие того, что связывает с условием Кулона – Мора эмпирический критерий Г.К. Арнольда, а не третью теорию прочности.

Подстановка выражений для расчета пределов прочности в уравнение предельного состояния О. Мора (10) приводит к уравнению:

$$\sigma_1 - \left( \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \cdot \sigma_3 = 2 \cdot c \cdot \left( \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)^b. \quad (28)$$

Выполнив в условии (28) преобразования, получим уравнение предельного состояния в виде

$$\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^b \cdot \left( \sigma_1 - \left( \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \cdot \sigma_3 \right) = c. \quad (29)$$

Таким образом, авторами решены две первые задачи на пути к поставленной цели совершенствования расчета дорожной конструкции по сопротивлению сдвигу.

Из анализа уравнения (29) следует, что при  $b = 0$  это условие пластичности приобретает вид критерия Г.К. Арнольда (8), а при  $b = 0.5$  – Кулона – Мора (7).

## Заключение

В заключении подведем итог по материалам, изложенным в исследовательской части, и укажем пути их дальнейшего применения.

1. Ввод третьего параметра в условие Кулона – Мора позволяет учитывать величину предельных деформаций, при возникновении которых наступает предельное состояние по модифицированному условию пластичности.

2. Установлено следующее.

2.1. Появление площадок скольжения при трехосном сжатии суглинка легкого соответствует отношению осевой деформации  $\varepsilon_1$  к предельной для условия Кулона – Мора деформации  $\varepsilon_{1c}$ , равному  $\varepsilon_1/\varepsilon_{1c} = 0.5$ . Это отношение определяет нижнюю границу варьирования параметра  $d = 0.3$ .

2.2. Прогрессирование локализации деформаций вдоль площадок скольжения имеет место при вариации отношения  $\varepsilon_1/\varepsilon_{1c}$  в интервале 0.5...0.8. Такому интервалу соответствует варьирование параметра  $d$  в пределах  $0.3 \geq d \geq 0.45$ .

2.3. При  $\varepsilon_1/\varepsilon_{1c} = 0.8$  процесс формирования площадок сдвига заканчивается, а величина  $d = 0.45$  является верхним пределом интервала варьирования введенного авторами параметра.

3. Разработан способ модификации оригинальных условий пластичности, состоящий в том, что принимаются два оригинальных критерия, предельные поверхности которых ограничивают область варьирования поверхности разрушения модифицированного критерия. Одним из этих условий является критерий Кулона – Мора, предельная поверхность которого в расчетах по сопротивлению сдвигу дорожных конструкций должна ограничивать диапазон варьирования поверхностей разрушения сверху.

Затем подбираются формулы, описывающие связь пределов прочности на сжатие и растяжение с параметрами предельной прямой  $c$  и  $\varphi$  и третьим параметром  $d$ . Подбор формул выполняют так, чтобы при  $d = 0.5$  эти зависимости преобразовывались к (15) и (16), а при  $d = 0$  определяли связь пределов прочности с параметрами оригинального критерия, который

Aleksandrov A.S., Kalinin A.L. Improvement of shear strength design of a road structure. Part 1. Deformations in the Mohr – Coulomb plasticity condition

ограничивает модифицированное условие снизу. Подстановкой подобранных формул в критерий Мора для сжатия (10) выводят уравнение предельного состояния модифицированного критерия.

4. Модифицированное авторами условие Кулона – Мора (19) можно положить в основу расчетов по сопротивлению сдвигу. В этом случае после подстановки в уравнение (19) функций главных напряжений его левая часть будет определять величину касательных напряжений. Кроме того, представив главные напряжения произведением давления и функции затухания напряжения по глубине из уравнения (19), можно получить формулу для определения безопасного давления на грунт земляного полотна или песчаный дополнительный слой основания дорожной одежды.

### Литература

1. Balay J.M., Kerzreho J.P. Assessment of French design method for flexible pavement by mean of the LCPC.s ALT facility // 3rd International Conference APT'08. Madrid, Spain, 1–3 October. 2008. Pp. 1–12.
2. Баданин А.Н. Обоснование первой критической нагрузки на зернистую среду супесчаного основания // Инженерно-строительный журнал. 2012. №9. С. 29–34.
3. Казарновский В.Д. Определение расчетных значений прочностных характеристик песков с учетом воздействия повторных нагрузок // Исследования по механике дорожных одежд: сб. т. М.: СоюздорНИИ, 1985. С. 80–92.
4. Петрушин Е.А. Сдвигоустойчивость глинистых грунтов в условиях кратковременных многократных нагрузок // Совершенствование методов расчета и конструирования дорожных одежд. М.: СоюздорНИИ, 1986. С. 88–96.
5. Ефименко В.Н. Учет региональных природно-климатических условий при уточнении норм проектирования автомобильных дорог // Наука и техника в дорожной отрасли. 2012. №1. С. 14–17.
6. Ефименко С.В. Некоторые вопросы совершенствования норм проектирования дорожных одежд автомобильных дорог // Дороги и мосты. 2013. Т.1(29). С. 81–91.
7. Elsworth D. [et al.]. Pore Pressure Response Following Undrained uCPT Sounding in a Dilating Soil // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2006. Vol. 132(11). Pp. 1485–1495.
8. Hasan J.U., Frenlund D.J. Pore pressure parameters for unsaturated soils // Canadian Geotechnical Journal. 1980. Vol. 17. Pp. 395–404.
9. Zhang Z. et al. Experimental Investigation on Excess Pore Water Pressure in Soft Soil-Foundations under Minor Shocks // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009. Vol. 3(2). Pp. 457–461.
10. Englund J. Analysis of Resilient Behavior of Unbound Materials for the Purpose of Predicting Permanent Deformation Behavior. Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. 2011. 154 p.
11. Werkmeister S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions. Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany. 2003. 189 p.
12. Oka F. Computational modeling of large deformations and failure of geomaterials // XVI ICSMGE. Osaka, 2005. Millpress. Vol. 1. Pp. 47–94.
13. Roscoe K.H. The influence of strains in soil mechanics // Geotechnique. 1970. Vol. 20(2). Pp. 129–170.
14. Hill R. Acceleration waves in soils // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1962. Vol. 10. Issue 1. Pp. 1–16.
15. Rice J.R. The localization of plastic deformation // Theoretical and Applied Mechanics. 1976. Pp. 207–220.
16. Higo Y., Oka F., Kodaka T., Kimoto S. Three-dimensional strain localization of water-saturated clay and numerical simulation using an elasto-viscoplastic model //

### References

1. Balay J.M., Kerzreho J.P. Assessment of French design method for flexible pavement by mean of the LCPC.s ALT facility. 3rd International Conference APT'08. Madrid, Spain, 1–3 October. 2008. Pp. 1–12.
2. Badanin A.N., Bugrov A.K., Krotov A.V. Obosnovaniye pervoy kriticheskoy nagruzki na zemnistuyu sredy supeschanogo osnovaniya [Justification of the first critical load on the granular medium sandy loam base]. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 9. Pp. 29–34. (rus)
3. Kazarnovskiy V.D., Smirnov V.M., Kosarev Yu.I. Opredeleniye raschetnykh znacheniy prochnostnykh kharakteristik peskov s uchedom vozdeystviya povtornykh nagruzok [Determination of the design values of strength characteristics of sand for the effect of repeated loads]. *Issledovaniya po mekhanike dorozhnykh odezhd*. Moscow. Soyuzdornii. 1985. Pp. 80–92. (rus)
4. Petrushin Ye.A. Sdvigoustoychivost glinistykh gruntov v usloviyakh kratkovremennykh mnogokratnykh nagru-zok [Shear stability of clay soils in the conditions of short-term multiple loads]. *Trudy Soyuzdornii. Sovershenstvovaniye metodov rascheta i konstruirovaniya dorozhnykh odezhd*. Moscow. Soyuzdornii. 1986. Pp. 88–96. (rus)
5. Yefimenko V.N., Yefimenko S.V., Badina M.V. Uchet regionalnykh prirodno-klimaticheskikh usloviy pri utochnenii norm proyektirovaniya avtomobilnykh dorog [Taking into account regional climatic conditions in refining the design standards of road]. *Science and Engineering for Highways*. 2012. No. 1. Pp. 14–17. (rus)
6. Yefimenko S.V., Yefimenko V.N., Badina M.V. Nekotoryye voprosy sovershenstvovaniya norm proyektirovaniya dorozhnykh odezhd avtomobilnykh dorog [Some issues of improving design standards of road pavement roads]. *Roads and bridges*. 2013. Vol. 1(29). Pp. 81–91. (rus)
7. Elsworth D. et al. Pore Pressure Response Following Undrained uCPT Sounding in a Dilating Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2006. Vol. 132(11). Pp. 1485–1495.
8. Hasan J.U., Frenlund, D.J. Pore pressure parameters for unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 1980. Vol. 17. Pp. 395–404.
9. Zhang Z. et al. Experimental Investigation on Excess Pore Water Pressure in Soft Soil-Foundations under Minor Shocks. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009. Vol. 3(2). Pp. 457–461.
10. Englund J. *Analysis of Resilient Behavior of Unbound Materials for the Purpose of Predicting Permanent Deformation Behavior*. Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. 2011. 154 p.
11. Werkmeister S. Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions. *Ph.D. thesis, University of Technology, Dresden, Germany*. 2003. 189 p.
12. Oka F. Computational modeling of large deformations and failure of geomaterials. *XVI ICSMGE*. Osaka, 2005. Vol. 1. Pp. 47–94.
13. Roscoe K.H. The influence of strains in soil mechanics. *Geotechnique*. 1970. Vol. 20(2). Pp. 129–170.

Александров А.С., Калинин А.Л. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть I. Учет деформаций в условии пластичности Кулона – Мора

- Philosophical Magazine. 2006. Vol. 86. Pp. 3205–3240.
17. Oka F. [et al.]. Strain localization of rectangular clay specimen under undrained triaxial compression conditions // Proceedings of The 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, September 12–16, Osaka, Japan. Pp. 841–844.
  18. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis of limit design // Quarterly of applied mechanics. 1952. Vol. 10. №2. Pp. 157–165.
  19. Lade P.V. Elastic-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces // International Journal of Solids and Structures. 1977. Vol. 13. Pp. 1019–1035.
  20. Lade P.V., Duncan, J.M. Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil // Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. Vol. 101. №10. 1975. Pp. 1037–1053.
  21. Matsuoka H., Nakai T. Stress-deformation and strength characteristics soil under three different principal stresses // Proceedings Japanese Society Civil Engineering. 1974. Vol. 232. Pp. 59–70.
  22. Matsuoka H., Nakai T. Relationship among Tresca, Mises, Mohr–Coulomb and Matsuoka–Nakai failure criteria // Soils and Foundation. 1985. Vol. 25. №4. Pp. 123–128.
  23. Huang W., Sloan S., Fityus S. Incorporating a predefined limit condition in a hypoplastic model by means of stress transformation // Mechanics of materials. 2008. Vol. 40. Pp. 796–802.
  24. Arnold G.K. Rutting of Granular Pavements. Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. 2004. 417 p.
  25. Долгих Г.В. Расчет грунтов земляного полотна по критерию безопасных давлений // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2013. №6(34). С. 43–49.
  26. Калинин А.Л. Применение модифицированных условий пластичности для расчета безопасных давлений на грунты земляного полотна // Инженерно-строительный журнал. 2013. №4. С. 35–45.
  14. Hill R. Acceleration waves in soils. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1962. Vol. 10. Issue 1. Pp. 1–16.
  15. Rice J.R. The localization of plastic deformation. *Theoretical and Applied Mechanics*. 1976. Pp. 207–220.
  16. Higo Y., Oka F., Kodaka T., Kimoto S. Three-dimensional strain localization of water-saturated clay and numerical simulation using an elasto-viscoplastic model. *Philosophical Magazine*. 2006. Vol. 86. Pp. 3205–3240.
  17. Oka F. et al. Strain localization of rectangular clay specimen under undrained triaxial compression conditions. *Proceedings of The 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, September 12–16, Osaka, Japan*. Pp. 841–844.
  18. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis of limit design. *Quarterly of applied mechanics*. 1952. Vol. 10. No. 2. Pp. 157–165.
  19. Lade P.V. Elastic-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces. *International Journal of Solids and Structures*. 1977. Vol. 13. Pp. 1019–1035.
  20. Lade P.V., Duncan, J.M. Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*. Vol. 101. No. 10. 1975. Pp. 1037–1053.
  21. Matsuoka H., Nakai T. Stress-deformation and strength characteristics soil under three different principal stresses. *Proceedings Japanese Society Civil Engineering*. 1974. Vol. 232. Pp. 59–70.
  22. Matsuoka H., Nakai T. Relationship among Tresca, Mises, Mohr–Coulomb and Matsuoka–Nakai failure criteria. *Soils and Foundation*. 1985. Vol. 25. No. 4. Pp. 123–128.
  23. Huang W., Sloan S., Fityus S. Incorporating a predefined limit condition in a hypoplastic model by means of stress transformation. *Mechanics of materials*. 2008. Vol. 40. Pp. 796–802.
  24. Arnold G.K. *Rutting of Granular Pavements*. Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. 2004. 417 p.
  25. Dolgikh G.V. Raschet gruntov zemlyanogo polotna po kriteriyu bezopasnykh davleniy. [Calculation of subgrade soil by criteria of safety pressures]. *Vestnik SibADI*. 2013. Vol. 6(34). Pp. 43–49. (rus)
  26. Kalinin A.L. Primneniye modifitsirovannykh usloviy plastichnosti dlya rascheta bezopasnykh davleniy na grunty zemlyanogo polotna [Use of the modified conditions of plasticity for calculating sound pressure at the soil subgrade]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 4. Pp. 35–45. (rus)

Анатолий Сергеевич Александров,  
8-913-616-42-12; эл. почта:  
Aleksandrov00@mail.ru

Александр Львович Калинин,  
+7(965)9858572; эл. почта:  
a1exsandr55ne@mail.ru

Anatoliy S. Aleksandrov,  
+7(913)6164212; Aleksandrov00@mail.ru

Alexsandr L. Kalinin,  
+7(965)9858572; a1exsandr55ne@mail.ru

© Александров А.С., Калинин А.Л., 2015

doi: 10.5862/MCE.59.2

## Основные аспекты ценностно-ориентированного управления инвестиционно-строительными жилищными проектами

### The main aspects of the value-oriented management of investment and construction housing projects

**Соискатель И.Б. Азарова,**  
*Международный гуманитарный университет,*  
*г. Одесса, Украина*

**I. Azarova,**  
*International Humanitarian University, Odessa,*  
*Ukraine*

**Ключевые слова:** ценностно-ориентированное управление; управление инвестиционно-строительными проектами; жилищное строительство; стейкхолдер-подход

**Key words:** value-oriented management; project management in construction; residential construction; stakeholder approach

**Аннотация.** Актуальность проблемы повышения обеспеченности населения на территории стран СНГ качественным и доступным жильем с минимальными рисками реализации жилищных проектов очевидна. Для ее решения авторы статьи предлагают пересмотреть принципы управления инвестиционно-строительными жилищными проектами на базе инструментария управления проектами, теории стейкхолдеров и эволюционной теории ценностей. Необходимо перенести акценты с максимизации прибыли строительных компаний при возведении жилья на повышение удовлетворенности результатами социально значимых жилищных проектов всеми его заинтересованными сторонами – стейкхолдерами. Целью данного исследования является разработка действенного и удобного в использовании механизма оценки, установления баланса и управления общественной ценностью жилья наряду с его денежной стоимостью. Чтобы уйти от идеи максимизации прибыли, ценность жилых проектов выражается в нефинансовых показателях, рассматривается как степень соответствия результатов проекта интересам его стейкхолдеров. Этот интерес представлен как желаемая экономическая, социальная, психологическая, ресурсная и любая другая ожидаемая выгода от проекта. Предложенная система ценностно-ориентированного управления жилищными проектами охватывает период от инвестиционной идеи до вывода жилого здания из эксплуатации. Рассмотрено, кто и как должен осуществлять ценностно-ориентированное управление жилищными проектами. Предложена методика анализа стейкхолдеров проекта на базе экспертных оценок, предложена математическая модель определения ценности проектов в нефинансовых показателях. Основанные на современных теоретических и методических принципах результаты могут быть применены в ценностно-ориентированном управлении жилыми проектами, а также в других отраслях проектного управления, в научно-исследовательском и учебном процессах.

**Abstract.** The urgency of the problem of providing people in CIS countries with quality, affordable housing with minimal risk of implementation of housing projects is obvious. To solve this problem, the authors proposed to review the principles of managing investment and construction housing projects based on project management tools, stakeholder theory and evolutionary theory of values. It is necessary to shift the focus from maximizing profits of construction companies to increasing the satisfaction with the significant social housing projects for all of their stakeholders. The aim of this study is to develop an effective and easy-to-use mechanism for evaluating, balancing and managing the social and public values of property along with its monetary value. The value of residential projects is expressed in non-financial indicators in order to get away from the idea of profit maximization. The value of the project is regarded as the coincidence between results of the project and the interests of its stakeholders, and stakeholder interests are represented as the desired economic, social, psychological, resource and other expected benefit of the project. The proposed system of value-based management of housing projects covers the period of the investment project from the idea of a residential building to its end of exploitation. We discuss which groups of agents should manage value-oriented housing projects and the means by which it should be implemented. A technique of analyzing project stakeholders based on expert evaluations is proposed, and a mathematical model for assessing the value of projects in non-financial terms is developed. The results achieved using current theoretical and methodological principles correspond to the goals of scientific research and can be used in value-oriented management of Азарова И.Б. Основные аспекты ценностно-ориентированного управления инвестиционно-строительными жилищными проектами

residential projects as well as in other sectors of project management in research and educational processes.

### *Введение*

Управление инвестиционно-строительными проектами в области жилищного строительства на территории постсоветских государств сегодня сталкивается со значительной неопределенностью и постоянно возрастающей сложностью рыночного окружения проектов, высокими рисками их реализации, нехваткой средств финансирования, недостаточным качеством строительных работ и другими трудностями. С другой стороны, согласно проведенным ранее исследованиям на территории Украины [1], потребители сталкиваются с нехваткой качественного и доступного жилья на рынке. Многие проекты по строительству жилья остановлены или заморожены. Несмотря на то, что доля средств населения в общем объеме финансирования жилья в последние годы в России составляет 41 %, на жилые дома, сооружение которых законсервировано, окончательно прекращено или временно приостановлено, приходилось 5.9 % от всех незавершенных объектов, или 4.5 % от всех жилых новостроек [2]. В Украине с привлечением средств населения возводится до 60 % всего жилья [3], но и здесь даже наименее рискованные схемы финансирования приводят к неудачам проектов более чем в 12 % случаев [4]. Государственные программы Украины по обеспечению населения жильем малоэффективны и плохо финансируются [5].

Актуальность проблемы повышения обеспеченности населения на территории стран СНГ качественным и доступным жильем с минимальными рисками реализации жилищных проектов очевидна. Для решения этой проблемы, согласно научной гипотезе авторов статьи, наряду с очевидными мерами по стабилизации экономики, привлечению инвестиций, усовершенствованию законодательства в строительстве, повышению уровня жизни населения и др., следует пересмотреть принципы управления инвестиционно-строительными жилищными проектами, используя инструментарий управления проектами, теорию стейкхолдеров, эволюционную теорию ценностей. Необходимо перенести акценты с максимизации прибыли строительных компаний при возведении жилья на повышение удовлетворенности результатами социально значимых жилищных проектов всеми его заинтересованными сторонами – стейкхолдерами. Принцип достижения баланса интересов всех стейкхолдеров, применяемый как в рамках отдельного строительного проекта, так и в рамках всей отрасли, будет больше способствовать устойчивому развитию строительного сектора в качестве двигателя всей экономики, чем принцип максимизации прибыли одного из участников проекта [6].

Российскими и украинскими исследователями [7, 8] понятие ценностно-ориентированного управления, которое пришло к нам из англоязычных стран, трактуется неоднозначно. Отчасти это связано с тем, что в английском языке отсутствует смысловое разделение понятий «стоимость» и «ценность», поэтому исторически сложились два направления в ценностно-ориентированном управлении. Первое, представленное как Value-Based Management, определяет цель бизнеса как максимизацию его стоимости для поставщиков капитала. Второе, основанное на теории заинтересованных сторон (Stakeholder Theory), настаивает на том, что бизнес должен приносить пользу не только его собственникам, но и всем, кого он так или иначе касается – обществу, потребителям, партнерам, природе и даже будущим поколениям. Целевая функция компании в этом случае многофакторная, круг заинтересованных лиц стремится к бесконечности, а приоритеты их интересов определить непросто. И все же есть достаточно действенный пример реализации такого подхода в управлении предприятием – сбалансированная система показателей (Balanced Scorecard, или BSC), разработанная Р. Капланом и Д. Нортон. Чтобы упростить систему, авторы предлагают ограничиться рассмотрением 15...25 ключевых показателей эффективности, между которыми устанавливается и отслеживается баланс.

Проецировать такой подход из стратегического и операционного менеджмента в проектный без учета особенностей проектной деятельности было бы ошибкой. Проект, согласно общепринятому определению [9], – это уникальная деятельность, и, как все новое, его сопровождает нехватка, ограниченность и изменчивость информации, необходимой для принятия ключевых решений, особенно на начальных этапах. Реализация проектов ограничена во времени, в связи с чем интенсивность хозяйственной деятельности в них больше, чем в производстве, инертность ниже, а динамичность окружения – выше. Кроме того, проекты, а в особенности жилищные, очень часто «мигрируют» на протяжении их реализации из одной компании в другую. Строительством занимается одна организация, продажами – другая, эксплуатацией – третья, снабжением ресурсами – четвертая. Замыкаться на каких-то одних ключевых показателях при этом было бы ошибочно.

Базовые механизмы ценностно-ориентированного управления проектной деятельностью изложены в стандарте Project and Program Management (P2M) [10]. Процесс управления ценностью, согласно P2M, предусматривает непрерывную ее оценку. Через управление ценностью обеспечивается максимизация результата для заинтересованных сторон, привлекаемых к процессу управления. Тем не менее, подход к определению ценности или установлению баланса интересов заинтересованных сторон, особенно для социально значимых проектов, не раскрывается.

### **Обзор литературы**

Усовершенствованию механизмов управления проектами, в том числе в строительстве, посвящены научные труды таких российских ученых, как Г.А. Архангельский, В.И. Воропаев, П.Г. Грабовой, В.А. Заренков [11], А.А. Иващенко, В.Н. Кабанов, В.А. Каменецкий, Н.Л. Карданская, Н.Б. Косарева, Н.Ф. Костецкий, В.И. Кудашов, И.И. Мазур [12], Е.П. Панкратов, Ю.И. Попов, М.Л. Разу, М.Е. Серов, Д.Н. Стороженко, В.З. Черняк, В.Д. Шапино, Е.Л. Якушевский и др. В числе зарубежных ученых, работавших над этой темой, Р. Арчибальд, Х.-Ю. Варнеке, К. Грей [13], М. Кассон, К. Кент, А. Линк, П. Моррис [14], С. Охара, М. Портер, Дж. Пинто [15], Р. Ротберг, Р. Фостер, Р. Хизрич, Э. Янч и др. Установление баланса интересов участников проекта в указанных работах полностью не освещено.

Исследование ценностно-ориентированного подхода в управлении проводили С.Д. Бушуев, Н.С. Бушуева, И.А. Бабаев, Д.Л. Волков [7], Р. Каплан, Т. Коупленд, Д. Мактаггарт, А.Г. Мендрул, В.В. Молоканова [16], Д. Нортон, Б. Ньюмен, П. Пеллеманс, М.И. Рич [17], В.Б. Рогозина [18], М. Рокич, Т.В. Романов, Ю.М. Плотник, И.В. Трифонов, Дж. Шет и другие. Развитием теории стейкхолдеров занимались такие ученые как П. Гомес [19], В.В. Грабарь [20], И.Б. Гурков, С. Майлз, А. Менделоу [21], Р. Митчелл [22], Е.М. Мухортов [23], Г. Саваж [24], В.В. Санин [25], К. Сколз, А. Фридман, Р. Фримен [26], Дж. Фруман, А. Хиллман [27], Б. Холцер и другие.

В последних научных исследованиях баланс интересов стейкхолдеров рассмотрен со следующих позиций:

- баланс устанавливается между стейкхолдерами только на базе их финансовых интересов, как это рассмотрено в работах М.И. Рича [17], В.В. Санина [25];
- рассматриваются интересы отдельно взятой группы стейкхолдеров жилищных проектов (бенефициаров), как в трудах Т.Г. Фесенко [28];
- баланс описывается в общих чертах в рамках ресурсной концепции, как в работах И.Б. Гуркова [6].

Данные подходы, несомненно, внесли ощутимый вклад в развитие теории стейкхолдеров, однако вопрос определения баланса интересов заинтересованных сторон и ценностно-ориентированного управления инвестиционно-строительными проектами остался нерешенным.

### **Постановка задачи исследования**

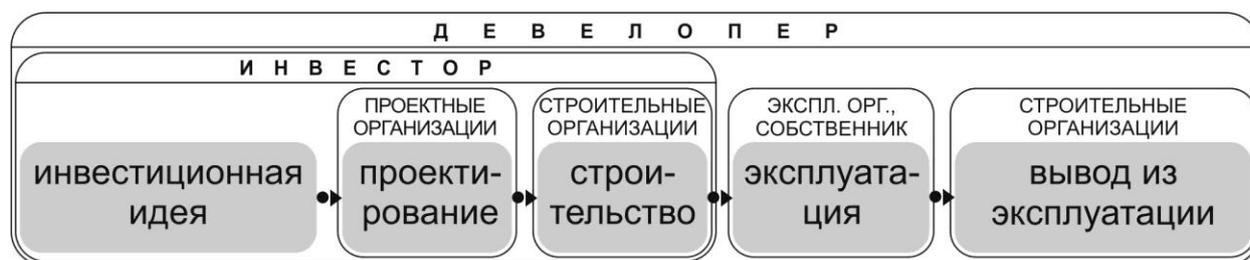
Целью данного исследования является разработка действенного и удобного в использовании механизма оценки, установления баланса и управления социальной, общественной ценностью жилья наряду с его денежной стоимостью. Чтобы уйти от идеи максимизации прибыли, ценность жилых проектов необходимо выразить в нефинансовых показателях. Система ценностно-ориентированного управления жилищными проектами должна охватывать период от инвестиционной идеи проекта до вывода жилого здания из эксплуатации.

### **Основные аспекты ценностно-ориентированного управления инвестиционно-строительными жилищными проектами**

Чтобы решить поставленные задачи, вначале определим основные термины. В данном исследовании под стейкхолдерами проекта следует понимать лицо, группу лиц и организации, которые способны влиять на реализацию проекта в течение его жизненного цикла, и/или проект способен повлиять на них. Интерес стейкхолдеров – это желаемая ими экономическая, социальная, психологическая, ресурсная и любая другая ожидаемая выгода от проекта. Ценность проекта будет выражаться степенью соответствия результатов проекта интересам его стейкхолдеров.

Баланс и конфликт интересов – два противоположных состояния отношений между стейкхолдерами. Перефразируя сугубо финансовый подход предыдущих исследователей [22], конфликт интересов можно сформулировать как структурную диспропорцию в распределении экономических, социальных, психологических, ресурсных и других выгод между стейкхолдерами, что вызывает неустойчивость и грозит распадом системы. Соответственно, баланс интересов – это структурная пропорция в распределении соответствующих интересов между стейкхолдерами, обеспечивающая устойчивость и синергизм системы.

Разобраться в том, кто должен осуществлять ценностно-ориентированное управление проектами на протяжении полного жизненного цикла жилья, устанавливать и отслеживать баланс интересов стейкхолдеров, можно с помощью рисунка 1.



**Рисунок 1. Схема взаимодействия участников инвестиционно-строительного жилищного проекта**

Рисунок 1 наглядно показывает, что такие участники проекта, как строители, проектировщики или эксплуатирующие организации, являясь его стейкхолдерами, полноценно управлять созданием ценности проекта на всех этапах не способны, так как взаимодействуют с ним только в определенный период. Инвестор, в том случае, когда он выступает инициатором проекта, закладывает на этапе инвестиционной идеи, в том числе, и характеристики ценности результатов, но управлять достижением необходимых параметров ему интересно только до этапа возврата инвестиций, который, как правило, наступает до стадии эксплуатации жилья.

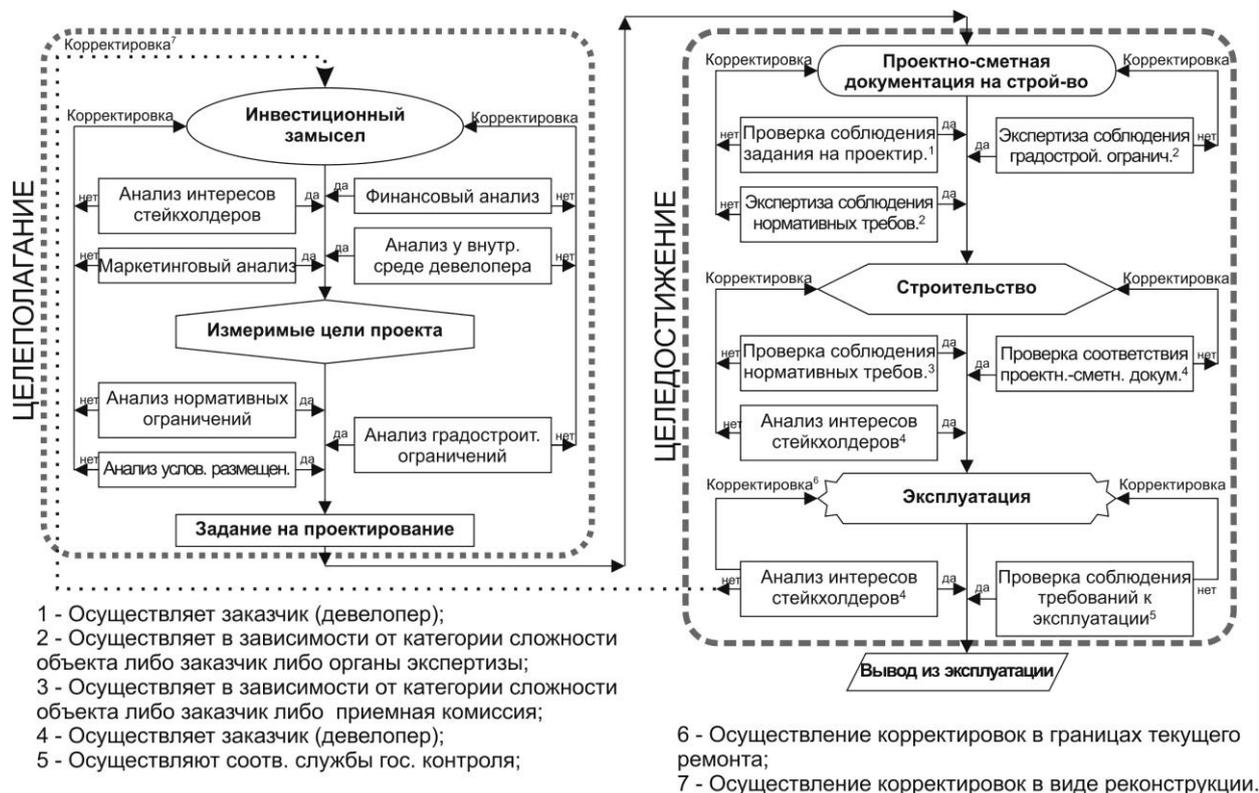
Наиболее перспективным субъектом рассматриваемого ценностно-ориентированного управления, на взгляд авторов статьи, является девелопер. Как правило, это компании, концентрирующие в себе несколько либо практически все функции, связанные с планированием, строительством, эксплуатацией, управлением проектом и, собственно, недвижимостью [29]. Именно они способны эффективно справляться со всеми проблемами строительства и эксплуатации не только жилой недвижимости, так как ведут объект от инвестиционного замысла в течение всего его жизненного цикла. Поэтому в их интересах обеспечить максимальную ценность проекта на всех этапах, а также соблюдение баланса интересов всех стейкхолдеров.

В объединении нескольких активных функций инвестиционно-строительного процесса в лице одного субъекта – девелопера, – с одной стороны, есть ряд положительных аспектов:

- полная ответственность за результаты инвестиционной деятельности;
- возможность влиять на результаты реализации проекта на всех этапах его осуществления;
- формирование устойчивых деловых связей на всех этапах реализации проекта;
- снижение себестоимости проекта и, как следствие, улучшение финансовых результатов;
- улучшение потребительских характеристик объекта, следствием чего является увеличение рыночной стоимости объекта.

С другой стороны, негативным моментом подобного рода совмещений функций является рост инвестиционных рисков, поскольку возможности делегировать последствия непредвиденных событий на других участников при совмещении функций просто нет.

Общий принцип осуществления ценностно-ориентированного управления созданием жилищных объектов на базе стейкхолдер-подхода в рамках девелоперских компаний представлен на рисунке 2.



**Рисунок 2. Цикл ценностно-ориентированного управления на базе стейкхолдер-подхода инвестиционно-строительного жилищного проекта**

Как видно из иллюстрации, интересы стейкхолдеров в предлагаемой концепции отражены изначально, на этапе формирования инвестиционного замысла. Под влиянием интересов стейкхолдеров, определенных уже на этом этапе, происходит целеполагание и формируются измеримые цели проекта. В принятой на сегодня практике строительства цели проекта формирует инвестор совместно с проектировщиком, исходя из своих интересов и учитывая собственное понимание интересов будущих жильцов.

Далее они закрепляются в задании на проектирование, согласно которому выполняется проектно-сметная документация. Затем на базе согласованной документации происходит строительство, в течение которого осуществляется мониторинг интересов стейкхолдеров, особенно тех, чьи интересы способны изменяться под действием внешних факторов. При необходимости в проект вносятся коррективы. После завершения строительства наступает стадия эксплуатации. В течение этой стадии, учитывая продолжительность этого этапа жизненного цикла – до 100 лет согласно действующей нормативной документации, также осуществляется мониторинг интересов стейкхолдеров. В случае получения результатов о несоответствии назначения или состояния здания интересам стейкхолдеров возможны два варианта развития событий.

1. Если интерес стейкхолдера-жителя или арендатора здания заключается в приведении в жилое состояние здания, за время эксплуатации потерявшего надлежащий вид, то это можно осуществить в рамках проведения планового ремонта. Проведение таких ремонтов является операционной деятельностью и должно предусматриваться в плановом режиме эксплуатирующей организацией.

2. Если стейкхолдер желает более радикальных изменений, – например, первые два этажа здания перестроить из жилых под офисные или торговые, то есть изменить назначение – то это уже реконструкция, которая фактически представляет собой новый проект. Тогда цикл повторяется. Если вспомнить S-образные кривые развития, данная точка соответствует завершению предыдущего и переходу на новый цикл.

Далее рассмотрим более детально, что представляет собой анализ интересов стейкхолдеров. Безусловно, даже самый опытный девелопер может оказаться не в состоянии на самом раннем этапе определить всех, чьи интересы затронет проект на всем его жизненном цикле. Кроме того, очевидно, что стейкхолдеры будут меняться: квартиры будут менять владельцев, будут меняться законы, нормативы и местная власть. В условиях такой неопределенности задаться какими-либо конкретными ценностными характеристиками крайне сложно.

Но с помощью метода экспертных оценок можно решить и эту задачу. Его сущность заключается в том, что необходимая информация извлекается из прогноза привлеченных специалистов, основанного на их научном, профессиональном и практическом опыте. Методы экспертных оценок, включающих два независимых элемента – определение возможных вариантов состояния объекта прогнозирования и их оценку – специалисты [30] обычно делят на две группы: методы коллективной работы экспертной группы и методы получения индивидуального мнения ее членов. Обе группы методов имеют определенные преимущества и недостатки использования. Коллективной работе, например, методам «мозговой атаки», сценариев, деловых игр, совещаний и «суда», «дерева целей», присущи возможности разностороннего анализа проблем наряду со сложностями процедуры получения информации, формирования группового мнения под влиянием индивидуальных суждений экспертов, возможностью давления авторитетов в группе. Методы получения индивидуального мнения, к которым можно отнести методы анкетного опроса, интервью и метод Дельфи, имеют такие преимущества, как оперативность и возможность в полной мере использовать индивидуальные способности эксперта; отсутствует давление авторитетов и лишние расходы на экспертизу. Однако главным недостатком является высокая степень субъективности получаемых оценок из-за ограниченности знаний одного эксперта.

На практике при использовании упомянутых методов в управлении инвестиционно-строительными жилыми проектами есть риск столкнуться с рядом дополнительных проблем, как чисто технических, связанных с поиском и привлечением к совместной работе специалистов различных отраслей от специалистов по недвижимости до пожарных, так и с принципиальными вопросами обработки полученной информации и сочетания мнений специалистов разных отраслей, которые часто оказываются прямо противоположными. Применение метода экспертных оценок на этапе анализа интереса стейкхолдеров и формулировки целей инвестиционно-строительных жилищных проектов будет иметь некоторые особенности. Обычно экспертные оценки направлены на решение одного аспекта или отдельной проблемы в рамках конкретной области – например, выбора лучшего варианта промышленного образца для запуска в массовое производство или определения лучших потребительских характеристик продукции. Выбираются эксперты в указанной области, и производится оценка. В случае жилищного строительства все несколько сложнее. Эта отрасль охватывает широкий круг вопросов по разным направлениям: недвижимости, финансирования, права собственности на землю и квартиры, безопасности строительства и эксплуатации, материального снабжения строительных работ, инженерного оборудования, эстетики и эргономики жизненного пространства человека, экологии, энергосбережения и множество других важных областей научных и практических знаний. Очевидно, что квалифицированного эксперта с исчерпывающими знаниями по всем этим вопросам не существует. Нет смысла также оценивать эксперту по недвижимости интересы стейкхолдеров – поставщиков строительных материалов в проекте. Поэтому, возможно, понадобятся экспертные оценки по определению экспертных областей для привлечения специалистов. Для этого, в частности, целесообразно применение метода «снежного кома». Анализ результатов подобных экспертных оценок также следует проводить в пределах соответствующих областей. Методика анализа и сведения оценок к наиболее оптимальным ценностным характеристикам проекта раскрыта ниже.

Использование метода экспертных оценок при целеполагании жилых проектов возможно для решения следующих вопросов:

- определение стейкхолдеров проекта;
- определение ключевых показателей проекта, по которым отдельные группы стейкхолдеров будут иметь свои интересы;
- оценка позиции каждого стейкхолдера относительно показателя проекта, оценка его влияния на проект, оценка стабильности позиции и готовности к сотрудничеству и коммуникациям.

Упомянутые вопросы могут выступить целями проведения одного комплексного опроса или серии отдельных исследований.

Следует заметить, что ни один из методов получения экспертных оценок или способов подбора самих экспертов не способен обеспечить абсолютно точный и успешный результат. На сегодня не существует также общепринятой научно обоснованной классификации методов экспертных оценок и тем более – однозначных рекомендаций по их применению [31]. Однако попытка формализовать процесс анализа стейкхолдеров требует выбора отдельных методов экспертных оценок для решения конкретных поставленных задач.

Для определения стейкхолдеров и ключевых показателей проекта, по мнению авторов статьи, мало приспособлены методики, основанные на сравнениях и количественных оценках. При условии некоторых адаптаций вполне возможно использование метода Дельфи, «дерева целей» и «мозгового штурма». «Дерево целей» можно использовать для удобного рассмотрения поэтапной реализации проекта и сопутствующих этим этапам интересов стейкхолдеров. При использовании метода Дельфи для определения стейкхолдеров проекта не следует сразу отвергать или требовать слишком тщательных объяснений экспертных оценок, содержащих стейкхолдеров, не упомянутых большинством экспертов, то есть от «диссидентов» по терминологии А.И. Орлова [31]. Возможно, именно этим методом будут выявлены те стейкхолдеры и показатели, которых не удастся обнаружить групповыми методами из-за давления авторитетов в группе.

Конечным результатом этапа определения стейкхолдеров проекта станет формирование перечня отдельных стейкхолдеров или основных их групп, объединенных по принципу общих интересов в проекте. По каждой группе стейкхолдеров нужно определить показатели проекта, отражающие их интересы в данном проекте.

Для оценки отношения определенных ранее стейкхолдеров к показателям проекта подходят такие методы экспертных оценок, как метод Дельфи, анкетного опроса, интервью, дискуссии, «мозгового штурма», совещаний и другие, которые позволяют получить непосредственную оценку в измеримой величине – баллах. Однако на этом этапе очень важно избежать «квалиметрического» подхода и попытки оценить объект экспертизы одним числом. Надо помнить, что жилой дом как результат проекта имеет много характеристик, от этажности до удобства доступа в дом для мам с детьми и колясками. Дом как проект, в свою очередь, имеет достаточно стейкхолдеров, каждый из которых заинтересован в собственном наборе характеристик строящегося жилья. Компромиссы и обобщения могут рассматриваться на последующих этапах, а оценка интересов стейкхолдеров должна выполняться ближе и точнее к сути. Некорректно также для упрощения определения целей проекта ставить перед экспертами задачу определения более и менее весомых интересов, например, между жителями жилого дома и его инвесторами.

Математическая обработка результатов экспертных оценок направлена на проверку согласованности оценок экспертов и усреднения мнений экспертов внутри согласованной группы. При этом обработку полученных экспертных оценок при определении стейкхолдеров и ключевых параметров проекта следует проводить на основе методов статистики объектов нечисловой природы, так как ответы экспертов представлены в нечисловом виде. Анализ полученных экспертных оценок об отношении стейкхолдеров к показателям проекта проводится на основе репрезентативной теории измерений. Теория позволяет установить отношения между реальными объектами и их характеристиками как отношения между числами. Если единства в экспертных оценках не наблюдается, их следует разделить на отдельные группы. Окончательные оценки экспертов целесообразно также рассматривать в рамках отдельной экспертной области, например, методом «медианы Кемени» [32]. Этот метод позволяет определить среднюю оценку экспертов как решение оптимизационной задачи по минимизации расстояния от среднего искомого значения до остальных оценок экспертов.

Особое внимание следует уделить определению надежности полученного результата. Для обеспечения специалистами точности оценок рекомендуется привлечение достаточного количества экспертов, проведения ими оценки собственной компетентности и взаимной оценки, анализ формальных показателей – наличие квалификационного сертификата, стажа, опыта участия в подобных экспертизах и др. Оценка компетенции экспертов, рассматриваемая через величину отклонения от средней коллективной, которую советуют некоторые научные источники [33, 34], в данном случае малоэффективна и может навредить результату.

Значительно повысить точность результатов можно за счет многократного повторения или дублирования опросов, но это повышает и расходы на исследования, а финансов в строительстве и так не хватает. Кроме того, ни одни из мероприятий не дадут гарантированного успешного стопроцентного результата, как было сказано ранее. Поэтому метод экспертных оценок всегда следует рассматривать как метод получения информации лицом, принимающим решения, а не способ переложить свою ответственность за решение на экспертов.

Финальный результат анализа стейкхолдеров с использованием экспертных оценок может быть представлен в виде диаграммы, как на рисунке 3.

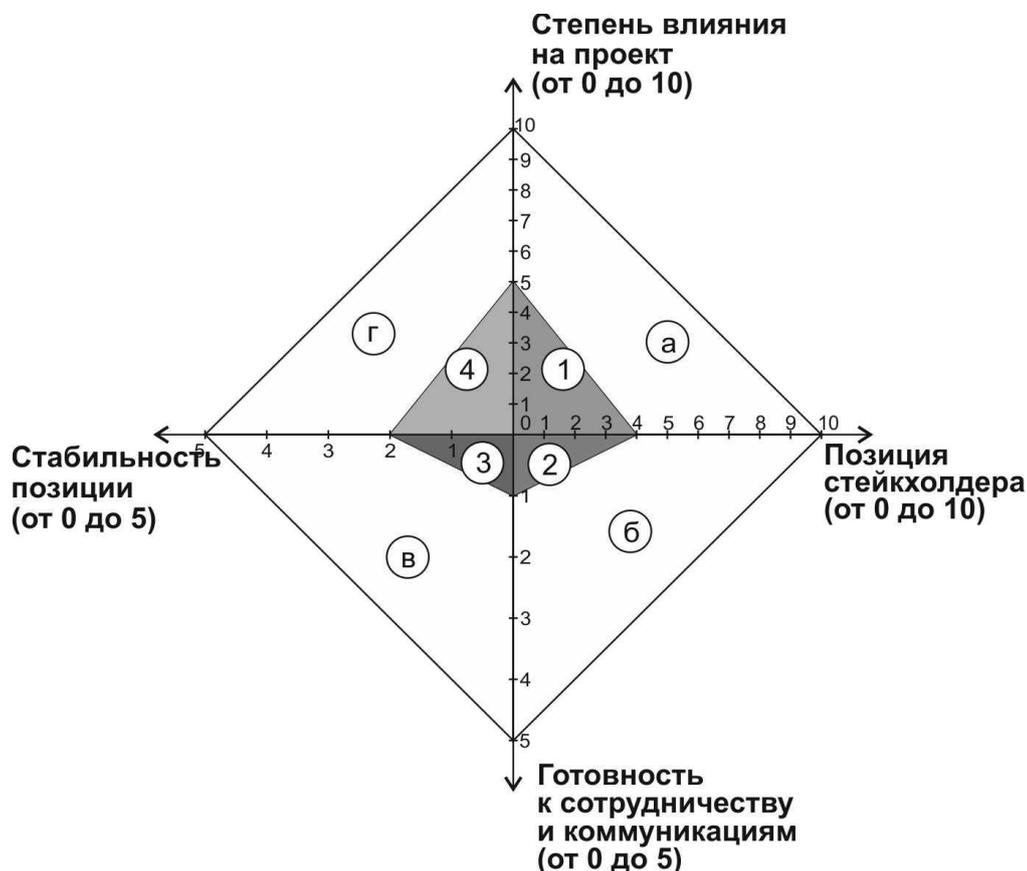


Рисунок 3. Лепестковая диаграмма анализа стейкхолдеров

Диаграмма помогает четче обозначить полученную благодаря экспертным оценкам позицию стейкхолдера относительно отдельно взятого показателя проекта по зоне, в которую попадают его данные.

В частности, зона 1 – критическая зона – стейкхолдер не поддерживает показатель проекта и оказывает на него значительное влияние; зона 2 – стейкхолдер не поддерживает проект и не готов сотрудничать и т. д. Затем в соответствии с зоной избирается целесообразная стратегия поведения со стейкхолдерами, от партнерства в реализации проекта в случае контактной поддерживающей позиции до изменений показателей проекта по требованию стейкхолдеров в случае влиятельной противодействующей позиции.

Если изменение показателей в угоду интересов отдельной группы стейкхолдеров приводит к конфликту интересов, формулирование измеримых целей проекта следует проводить согласно предложенной модели определения ценности.

Пусть  $S_1, S_2, \dots, S_n$  – это стейкхолдеры проекта:

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_n),$$

$P_m$  – показатели проекта, по которым стейкхолдеры имеют свои интересы. Тогда максимальная ценность проекта  $Z_m$  по отдельным показателям  $P_m$  может быть рассмотрена как умножение коэффициента влияния каждого стейкхолдера  $A_m$  на его поддерживающую позицию  $B_m$ :

$$Z_m = A_1 \times B_1 + A_2 \times B_2 + \dots + A_n \times B_n,$$

где  $A_n > 0$ .

Максимальная ценность всего проекта  $Z_{np}$  может быть представлена как сумма ценностей по каждому из показателей для каждого из стейкхолдеров:

$$Z_{np} = \sum_m^{i=1} Z_m.$$

Для данной модели условно считаем, что количество и влияние стейкхолдеров в ходе реализации проекта неизменны.

Сравнение значений фактической ценности проекта, определенной на базе фактических значений позиций и влияния с максимальной ценностью  $Z_{np}$  при изменении значений показателей  $P_m$ , позволит выбрать такой вариант сочетания показателей проекта, который обеспечит наибольшую ценность результатов проекта для его стейкхолдеров.

Когда при целеполагании в проекте невозможно получить показатели, удовлетворяющие абсолютно все группы стейкхолдеров, возникает отклонение  $\Delta Z$  между максимальной и фактической ценностью проекта, порождающее риски, связанные с несоответствием результатов проекта интересам его стейкхолдеров. Величину отклонения с использованием метода экспертных оценок можно разделить условно на три–четыре группы, приведенные с соответствующими уровнями риска в таблице.

**Таблица. Оценка рисков по показателю  $\Delta Z$**

Величина отклонения $\Delta Z$	Уровень риска IR
1	2
$\Delta Z < 20\%$	Присутствуют незначительные риски
$20\% \leq \Delta Z < 50\%$	Уровень риска средний
$50\% \leq \Delta Z < 90\%$	Значительные, существенные риски
$\Delta Z \geq 90\%$	Риск максимальный. Вероятна неудача проекта

Поиск способов обработки рисков возможен также с помощью методов экспертных оценок.

### **Практическая значимость и внедрение**

Результаты данного научного исследования были успешно внедрены в хозяйственную деятельность украинских компаний ООО «Агентство пожарной безопасности «ОПАЛ» и ООО «Укртехбезопасность».

Предложенная модель ценностно-ориентированного управления строительными проектами на базе стейкхолдер-подхода позволила:

- определить ценность проекта в нефинансовых показателях, что было осуществлено в управлении проектами впервые;
- обозначить круг заинтересованных сторон проекта и ключевые параметры проекта;
- выразить интересы стейкхолдеров в целях проекта;
- выявить конфликты интересов стейкхолдеров;
- оценить риски, связанные с выявленными конфликтами интересов.

Сближение круга интересов всех групп стейкхолдеров способствует их удовлетворению результатами проекта, повышает его ценность и снижает риски неудачной реализации из-за конфликтов интересов.

## Выводы

В статье приведено решение актуальной научной проблемы формирования принципов ценностно-ориентированного управления инвестиционно-строительными жилыми проектами с учетом интересов заинтересованных сторон. Показано, что успешное строительство жилья, обеспечивающее создание ценности для всех участников процесса, имеет большое социальное значение для населения страны. Статья предлагает новый, нетрадиционный подход к решению поставленной проблемы, что подтверждает научную новизну выполненного исследования.

Одной из основных преград для внедрения стейкхолдер-подхода в управление предприятиями и проектами является предположение, что это приведет к росту расходов компании. Однако парадокс заключается в том, что использование критериев баланса интересов стейкхолдеров за счет устойчивости и синергизма построенных отношений и связей в более длительных периодах дает больший прирост дохода, чем соблюдение критерия максимизации прибыли. Последний путь ведет к удлинению сроков реализации проектов, упущению выгоды и к прямым убыткам. Это, в частности, подтверждают эмпирические исследования в области стратегического менеджмента Б. Бенсона, В. Дэвидсона, Е. Хиллман и Дж. Кейм.

Результаты данного исследования предложено использовать в управлении инвестиционно-строительными проектами жилищного строительства для оценки их ценности, анализа интересов стейкхолдеров, установления баланса интересов и оценки рисков проектов, связанных с несоответствием целей проекта интересам его стейкхолдеров. Предложенная модель позволяет определять ценность проектов не только по финансовым показателям и обеспечивать баланс интересов всех стейкхолдеров проекта.

Внедрение в практику предложенных в данном исследовании положений позволяет осуществить эффективную ценностно-ориентированную балансировку интересов участников инвестиционно-строительной деятельности в жилищном строительстве, что подтверждается в материалах выполненных проектных работ, которые были осуществлены субъектами хозяйствования в строительной отрасли.

Полученные на современных теоретических и методических принципах результаты соответствуют поставленным целям научного исследования и могут быть применены в ценностно-ориентированном управлении жилыми проектами, а также в других отраслях проектного управления, в научно-исследовательском и учебном процессах.

## Литература

1. Рыбак А.И., Азарова И.Б. Анализ рисков строительных проектов в области жилищного строительства // Вестник НТУ «ХПИ». Х.: НТУ «ХПИ». 2014. №3(1046). С. 3–7.
2. О жилищном строительстве в Российской Федерации в 2014 году. Аналитическая записка [Электронный ресурс] // Материалы сайта Федеральной службы государственной статистики. URL: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/business/stroit/Jil-str-2014.rar](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/stroit/Jil-str-2014.rar) (дата обращения: 17.11.2015).
3. Котова В.М. Институты совместного инвестирования: функции и перспективы развития в Украине // Экономический простор. 2011. №53. С. 138–143.
4. Azarova I. An analysis of life cycle of projects in housing sector // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. Vol. 4. №1. С. 2–10.
5. Билёвский О.А. О состоянии выполнения и направлений усовершенствования Государственной целевой социально-экономической программы строительства (приобретения) доступного жилья. Аналитическая записка. [Электронный ресурс] / Национальный институт стратегических исследований при президенте Украины. 2014. №6. URL: <http://www.niss.gov.ua/articles/1591/> (дата обращения: 17.11.2015).
6. Гурков И.Б. Принципы устойчивого развития коммерческой фирмы // Экономическая наука современной России. 2011. №3(54). С. 91–100.
7. Волков Д.Л. Теория ценностно-ориентированного менеджмента: финансовый и бухгалтерский аспекты. 2-е изд. / Высшая школа менеджмента СПбГУ. СПб.:

## References

1. Rybak A.I., Azarova I.B. Analiz riskov stroitelnykh projektov v oblasti zhilishchnogo stroitelstva [Risk analysis of construction projects in housing]. *Vestnik NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KPI". Coll. scientific. works] Kharkiv. NTU "KPI". 2014. No. 3(1046). Pp. 3–7 (ukr)
2. O zhilishchnom stroitelstve v Rossiyskoy federatsii v 2014 godu. Analiticheskaya zapiska [About housing construction in the Russian Federation in 2014. Analytical note]. URL: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/business/stroit/Jil-str-2014.rar](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/stroit/Jil-str-2014.rar) (accessed: 17 November 2015). (rus)
3. Kotova V.M. Instituty sovmestnogo investirovaniya: funktsii i perspektivy razvitiya v Ukraine [Institutes of joint investment: features and prospects of development in Ukraine]. *Ekonomicheskij prostor*. 2011. No. 53. Pp. 138–143. (rus)
4. Azarova I. An analysis of life cycle of projects in housing sector. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 4. No. 1. Pp. 2–10.
5. Bilyovskiy O.A. O sostoyanii vyipolneniya i napravleniy usovershenstvovaniya Gosudarstvennoy tselevoy sotsialno-ekonomicheskoy programmy stroitelstva (priobreteniya) dostupnogo zhilya. Analiticheskaya zapiska. [On the state of implementation and ways to improve the State target socio-economic program for construction (purchase) of affordable housing. Analytical note] [online]. National Institute for Strategic Studies under the President of Ukraine. 2014. No. 6. URL: <http://www.niss.gov.ua/articles/1591/> (accessed: 17 November 2015). (ukr)
6. Gurkov I.B. Printsipy ustoychivogo razvitiya

Azarova I. The main aspects of the value-oriented management of investment and construction housing projects

- Издат. дом С.-Петерб. гос. ун-та, 2008. 320 с.
8. Лавренко В.В. Ценностно-ориентированное управление предприятием: ресурсные аспекты // Ученые записки: сб. науч. работ. 2012. Вып. 14, ч. 2. С. 139–144.
  9. A Guide to the Project Management Body of Knowledge: PMBOK(R) Guide 5th Edition. Project Management Institute. 2013. 589 p.
  10. P2M: Руководство по управлению инновационными проектами и программами организаций. К.: Новый друк. 2010. 160 с.
  11. Заренков В.А. Управление проектами. М.: Изд-во АСВ; СПб.: СПбГАСУ. 2006. 121 с.
  12. Мазур И.И. [и др.] Управление инвестиционно-строительными проектами: международный подход – Construction project management: international approach: руководство. 2-е изд., перераб. М.: Омега-Л, 2010. 736 с.
  13. Larson E.W., Gray C.F. Project Management: The Managerial Process. McGraw Hill, 2011. 608 p.
  14. Morris P.W.G., Pinto J.K. The Wiley Guide to managing projects. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. 1464 p.
  15. Pinto J.K., Rouhiainen P. Building Customer-Based Project Organizations. NY: John Wiley & Sons, 2002. 240 p.
  16. Молоканова В.М. Ценностно-ориентированное портфельное управление развитием организаций: дисс. ... докт. техн. наук / КНУСА. Киев, 2015. 412 с.
  17. Рич М.И. Ценности заинтересованных сторон в социальных и коммерческих проектах // Управление развитием сложных систем. 2013. №13 С. 45–49.
  18. Рогозина В.Б. Механизмы управления развитием проектно-ориентированных организаций на модели комплиментарных ценностей: дисс. ... канд. техн. наук / КНУСА. Киев, 2015. 145 с.
  19. Gomez P. Integrated Value Management. London, New York: International Thomson Business Press, 1999. 265 p.
  20. Грабарь В.В., Салмаков М.М. Анализ заинтересованных сторон проекта – методология, методика, инструменты [Электронный ресурс] // «ARS ADMINISTRANDI». 2014. №2. С. 36–44.
  21. Mendelow A. Stakeholder Mapping [Электронный ресурс] // Proceedings of the 2nd International Conference on Information Systems. Cambridge: MA, 1991. URL: <http://www.termpaperwarehouse.com/essay-on/Stakeholder-Mapping/140410> (дата обращения: 17.11.2015).
  22. Mitchell R.K., Agle B.R., Wood D.J. Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience: Defining the Principle of Who and What Really Counts. // Academy of Management Review. 1997. Vol. 22. №4. С. 853–888.
  23. Мухортов Е.М. Управление стратегическим развитием отраслевых комплексов на основе стейкхолдер-подхода [Электронный ресурс] // Экономический журнал. 2012. №28. С. 62–70.
  24. Savage G.T., Nix T.W. Whitehead and Blair. Strategies for Assessing and Managing Organizational Stakeholders Academy of Management Executive. 1991. Vol. 5. №2. С. 61–75.
  25. Санин В.В. Баланс и конфликт финансовых и экономических интересов стейкхолдеров в корпоративной стратегии холдинга: автореф. дисс. ... канд. экон. наук / СПбГУЭФ. СПб., 2011. 25 с.
  26. Freeman R.E. Strategic Management: A stakeholder approach Boston: Pitman, 1984. 292 p.
  27. Hillman A., Keim G. Stakeholder value, stakeholder management and social issues: What's the bottom line // Stakeholder Management Journal. 2001. Vol. 22. №2. Pp. 125–139.
  28. Фесенко Т.Г., Минаев Д.М. Интеграция интересов бенефициаров жилищного строительства в систему коммерческой фирмы [The principles of sustainable development of commercial firms]. *Ekonomicheskaya nauka sovremennoy Rossii*. 2011. No. 3(54). Pp. 91–100. (rus)
  7. Volkov D.L. *Teoriya tsennostno-orientirovannogo menedzhmenta: finansovyy i buhgalterskiy aspekti* [The theory of value-based management: financial and accounting aspects]. St. Petersburg. Pub. House St. Peterb. State. Univers. 2008. 320 p. (rus)
  8. Lavrenenko V.V. Tsennostno-orientirovannoe upravlenie predpriyatiem: resursnyie aspekti [Value-oriented business management: resource aspects]. *Uchenyye zapiski : zb. nauch. rabot* [Scientific Notes: collection of papers]. Kiev. 2012. Vol. 14. Part. 2. Pp. 139–144. (rus)
  9. A Guide to the Project Management Body of Knowledge: PMBOK(R) Guide 5th Edition. Project Management Institute. 2013. 589 p.
  10. P2M: Guidelines for the management of innovative projects and programs. Kiev. Novyyi druk. 2010. 160 p. (rus)
  11. Zarenkov V.A. *Upravlenie proektami*. [Project Management]. Moscow. Publishing house of the DIA. St. Petersburg. SPbGASU. 2006. 121 p. (rus)
  12. Mazur I.I. et al. *Upravlenie investitsionno-stroitelnyimi proektami: mezhdunarodnyiy podhod* [Construction project management: international approach]. Moscow. Omega-L. 2010. 736 p. (rus)
  13. Larson E.W., Gray C.F. *Project Management: The Managerial Process*. McGraw Hill. 2011. 608 p.
  14. Morris P.W.G., Pinto J.K. *The Wiley Guide to managing projects*. New Jersey. John Wiley & Sons. 2004. 1464 p.
  15. Pinto J.K., Rouhiainen P. *Building Customer-Based Project Organizations*. New York. John Wiley & Sons. 2002. 240 p.
  16. Molokanova V.M. *Tsennostno-orientirovannoe portfelnoe upravlenie razvitiem organizatsiy* [The value-oriented portfolio management of development organizations]. Doctoral theses. Kiev. KNUA. 2015. 412 p. (rus)
  17. Rich M.I. Tsennosti zainteresovannyih storon v sotsialnyih i kommercheskih proektah [Values of stakeholders in social and commercial projects]. *Upravlenie razvitiem slozhnykh sistem*. 2013. No. 13. Pp.45–49. (rus)
  18. Rogozina V.B. *Mehanizmy upravleniya razvitiem proektno-orientirovannyih organizatsiy na modeli komplimentarnyih tsennostey* [Mechanisms of management of development project-oriented organizations on the model of the complementary values]. PhD theses. Kiev. KNUA. 2015. 145 p. (ukr)
  19. Gomez P. *Integrated Value Management*. London – New York. International Thomson Business Press. 1999. 265 p.
  20. Grabar V.V., Salmakov M.M. Analiz zainteresovannyih storon proekta – metodologiya, metodika, instrumentyi [Stakeholder analysis of the project – methodology, methods, tools]. *ARS ADMINISTRANDI*. 2014. No. 2. Pp. 36–44. (rus)
  21. Mendelow A. Stakeholder Mapping [online]. *Proceedings of the 2nd International Conference on Information Systems*. Cambridge. MA. 1991. URL: <http://www.termpaperwarehouse.com/essay-on/Stakeholder-Mapping/140410> (accessed: 17 November 2015).
  22. Mitchell R.K., Agle B.R., Wood D.J. Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience: Defining the Principle of Who and What Really Counts. *Academy of Management Review*. 1997. Vol. 22. No. 4. Pp. 853–888.
  23. Muhortov E.M. Upravlenie strategicheskim razvitiem otraslevyih kompleksov na osnove steykholder-podhoda [Managing the strategic development of systems based on industry-stakeholder approach]. *Ekonomicheskii zhurnal*. 2012. No. 28. Pp. 62–70. (rus)
  24. Savage G.T., Nix T.W. Whitehead and Blair. Strategies for Assessing and Managing Organizational Stakeholders. *Academy of Management Executive*. 1991. Vol. 5. No. 2.

Азарова И.Б. Основные аспекты ценностно-ориентированного управления инвестиционно-строительными жилищными проектами

- ценностей проекта // Управление развитием сложных систем. 2015. №21. С. 81–86.
29. Мазур И.И., Шапиро В.Д. Девелопмент недвижимости. Справочник для профессионалов. М.: Елима; Омега-Л, 2009. 1035 с.
  30. Григан А.М. Управленческая диагностика: теория и практика: Монография. Ростов н/Д: Изд-во РСЭИ, 2009. 316 с.
  31. Орлов А.И. Теория принятия решений. Учебное пособие. М.: Экзамен, 2005. 565 с.
  32. Kemeny J.G., Snell J.L. *Mathematical Models In Social Sciences*. The MIT Press, 1978. 145 p.
  33. Израев Г.Х. Экспертные методы управления технологичностью промышленных изделий. М.: Инфра-Инженерия, 2010. 192 с.
  34. Малугин В.Д. Оценка компетентности экспертов в процессе принятия решений. М.: Наука, 1982. 147 с.
- Рр. 61–75.
25. Sanin V.V. *Balans i konflikt finansovyih i ekonomicheskikh interesov steykholderov v korporativnoy strategii holdinga* [Balance and conflict of financial and economic interests of the stakeholders in the corporate strategy of the holding]. PhD theses. St. Petersburg. SPbGUEF. 2011. 25 p. (rus)
  26. Freeman R.E. *Strategic Management: A stakeholder approach*. Boston. Pitman. 1984. 292 p.
  27. Hillman A., Keim G. Stakeholder value, stakeholder management and social issues: What's the bottom line? *Stakeholder Management Journal*. 2001. Vol. 22. No. 2. Pp. 125–139.
  28. Fesenko T.G., Minaev D.M. Integratsiya interesov benefitsiarov zhilishnogo stroitelstva v sistemu tsennostey proekta [Integration of beneficiaries of housing construction in the system of values of the project]. *Upravlenie razvitiem slozhnykh sistem*. 2015. No. 21. Pp. 81–86. (rus)
  29. Mazur I.I., Shapiro V.D. *Development nedvizhimosti. Spravochnik dlya professionalov* [Real Estate Development. Directory of professionals]. Moscow. Elim. Omega-L. 2009. 1035 p. (rus)
  30. Grigan A.M. *Upravlencheskaya diagnostika: teoriya i praktika: Monografiya* [Managerial diagnostics: theory and practice: Monograph]. Rostov-on-Don. RCEI. 2009. 316 p. (rus)
  31. Orlov A.I. *Teoriya prinyatiya resheniy*. [Decision theory]. Moscow. Examination. 2005. 565p. (rus)
  32. Kemeny, John G., Snell, James L. *Mathematical Models in Social Sciences*. The MIT Press. 1978. 145 p.
  33. Izraev G.H. *Ekspertnyie metodyi upravleniya tehnologichnostyu promyshlennyih izdeliy* [Expert management techniques adaptability of industrial products]. Moscow. Infra-Engineering. 2010. 192 p. (rus)
  34. Malyugin V.D. *Otsenka kompetentnosti ekspertov v protsesse prinyatiya resheni* [Evaluation of scientific expertise in decision-making]. Moscow. Nauka. 1982. 147 p. (rus)

Ирина Борисовна Азарова,  
+38(067)7227327; эл. почта: [partisia@mail.ru](mailto:partisia@mail.ru)

Irina Azarova,  
+38(067)7227327; [partisia@mail.ru](mailto:partisia@mail.ru)

© Азарова И.Б., 2015

doi: 10.5862/MCE.59.3

## Факторы, влияющие на разрушение бетона дорожных плит Factors affecting the deterioration of concrete pavement slabs

*Канд. техн. наук, доцент Н.М. Морозов,  
канд. техн. наук, доцент Н.М. Красникова,  
канд. техн. наук, старший преподаватель  
И.В. Боровских,  
Казанский государственный архитектурно-  
строительный университет, г. Казань,  
Россия*

*N.M. Morozov,  
N.M. Krasnikova,  
I.V. Borovskikh,  
Kazan State University of Architecture and  
Engineering, Kazan, Russia*

**Ключевые слова:** дорожные плиты; прочность; морозостойкость; водопоглощение; высокоалюминатный цемент

**Key words:** road slabs; strength; frost resistance; water absorption; high alumina cement

**Аннотация.** Работа конструкций в реальных условиях эксплуатации связана с воздействием окружающей среды. Для бетонов дорожных и аэродромных покрытий важна стойкость не только к механическим разрушениям, но и к воздействию попеременного замораживания и оттаивания. На примере дорожных плит заводского изготовления показаны причины раннего разрушения бетона. Установлены причины потери эксплуатационных свойств дорожного полотна, которые в первую очередь зависят от качества исходных материалов в бетоне. Установлено, что важными факторами, определяющими морозостойкость бетона дорожного полотна, помимо прочности, являются однородность и пористость бетона. Показано, что высокое содержание алюминатов в цементе приводит к разрушению бетона в первый год эксплуатации конструкций. Полученные результаты также могут косвенно свидетельствовать о нарушении технологии формирования дорожных плит на этапе производства.

**Abstract.** The behavior of constructions under actual operating conditions is affected by exposure to the environment. It is important that concrete roads and airport pavings are resistant not only to mechanical damage, but also to the effects of alternate freezing and thawing. The causes of early failure in concrete have been shown using prefabricated road slabs as an example. The causes of loss of performance properties of the roadway have been established, which are primarily dependent on the quality of raw materials in the concrete. It was found that, aside from durability, uniformity and porosity are important factors in determining the frost resistance of concrete roadways. It was shown that high aluminate content in the cement leads to concrete destruction in the first year of structure use. The results may also indirectly indicate a violation of forming technology during slab production.

### Введение

Долговечность дорожных покрытий определяется способностью сохранять эксплуатационную пригодность в течение определенного срока службы, заданного в проекте. Цементобетонные дорожные покрытия в процессе эксплуатации подвергаются внешним воздействиям: механическим (от движущегося транспорта), физическим и физико-химическим воздействиям окружающей среды и химических реагентов, используемых при зимнем содержании дорог [1–4]. Поэтому долговечность дорожных покрытий зависит от их соответствия условиям работы – воздействиям внешней среды.

В условиях России главным фактором агрессивного климатического воздействия на дорожный бетон является попеременное замораживание и оттаивание в присутствии водных растворов хлористых солей-антиобледенителей, особенно хлорида натрия. Именно воздействие хлорида натрия совместно с замораживанием–оттаиванием наиболее агрессивно по сравнению с другими антиобледенителями [5]. Соответственно, на первый план в обеспечении долговечности цементобетонных покрытий выходит надежная, гарантированно высокая морозостойкость бетона [6, 7]. Ее увеличению способствует ограничение максимального значения водоцементного отношения с одновременным уменьшением его главной структурной составляющей – цементного камня [8, 9]. Тем не менее, во многих случаях соблюдение данного правила не предотвращает

Морозов Н.М., Красникова Н.М., Боровских И.В. Факторы, влияющие на разрушение бетона дорожных плит

разрушение бетонных конструкций. Необходимо проводить дополнительные исследования состава бетона для выявления причин разрушения уже изготовленных изделий.

Немаловажным фактором является и прочность бетона на сжатие, которая определяет износостойкость цементобетонного покрытия, стойкость бетона к истиранию, скалыванию кромок плит, ударную стойкость, готовность к нарезке швов и раннему открытию движения и др. Прочность, как и морозостойкость, зависит от состава бетона, технологии его уплотнения и режима твердения [10]. При изготовлении бетона для дорожных покрытий важны свойства исходных материалов и, в большей степени, цемента и химических добавок. Так, например, увеличение содержания трехкальцевого алюмината в составе цементного клинкера ведет к снижению морозостойкости, а наличие в составе бетона некачественного щебня – к снижению и прочности, и морозостойкости [11–13]. Все эти факторы могут быть отрегулированы при изготовлении дорожных плит на заводах сборного железобетона. Однако в некоторых случаях (недостаточный контроль на производстве или недобросовестность поставщиков материалов) дорожные плиты могут разрушаться уже в первый год эксплуатации, хотя по прочностным характеристикам они соответствуют требованиям нормативных документов. Поэтому исследование причин разрушения уже уложенных в покрытие дорожных плит является важной технической и научной задачей как для исследователей, так и для практиков. Для получения полной картины причин, по которым происходит разрушение, необходимо не только оценивать прочность и морозостойкость бетона конструкций, но и исследовать параметры структуры и химический состав новообразований. Такое комплексное использование современных методов исследования позволит уже на раннем этапе эксплуатации спрогнозировать срок службы конструкций и возможные пути повышения их долговечности. В связи с этим целью работы стало выявление причин разрушения бетона дорожных плит на ранних этапах эксплуатации. Исследование проведено на примере дорожных плит, эксплуатировавшихся 6 месяцев в осенне-зимний период при малой интенсивности движения автомобильного транспорта (открытая стоянка машин).

### Материалы и методы

Исследование образцов бетона, отобранных из дорожной плиты покрытия, проведено на основании испытаний как по стандартным методикам, регламентируемым нормативными документами (ГОСТ 28570–90, ГОСТ 10180–12, ГОСТ 21924.0–84, ГОСТ 26633–2012, ГОСТ 12730.3–78, ГОСТ 12730.1–78, ГОСТ 10060–12, 31384–2008), так и по нестандартным, отвечающим задачам исследования и обеспечивающим необходимую точность и надежность – рентгенофазовый анализ (дифрактометр Bruker D8) и др.

Для оценки однородности и прочности бетона дорожного настила был произведен отбор кернов и их подготовка по ГОСТ 28570–90: №1 – верхний слой при эксплуатации или нижний слой при формовании; №2 – нижний слой при эксплуатации или верхний слой при формовании.

### Результаты и обсуждения

На первом этапе исследования была произведена оценка прочности бетона из нижнего и верхнего слоев дорожных плит. Результаты испытаний физико-механических свойств бетона плит представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Прочность образцов, отобранных из плит дорожного настила**

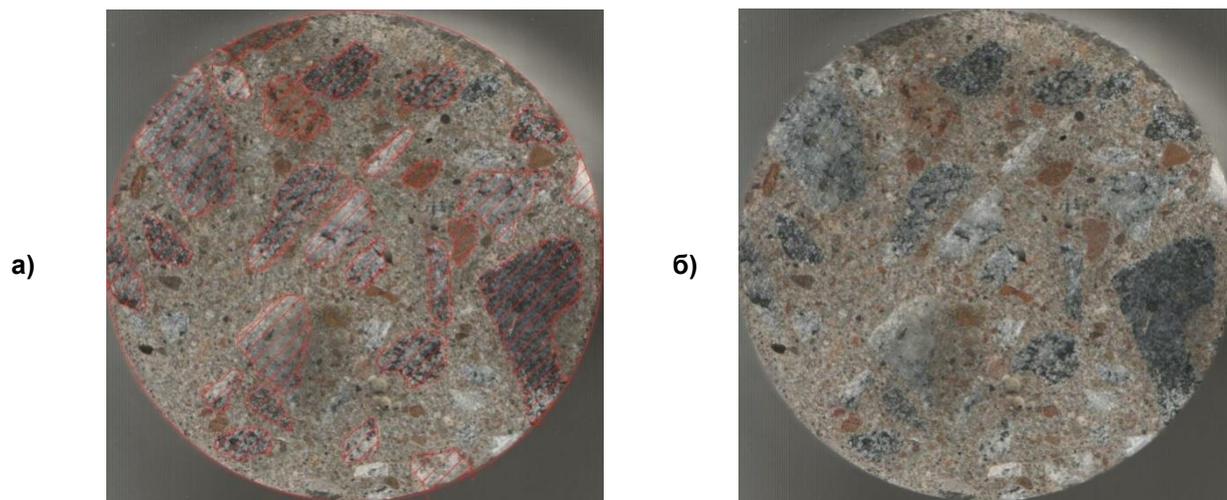
Слой плиты	№ образца	Характеристики образца		Показания пресса, кН	Приведенная прочность, МПа
		диаметр, см	плотность, кг/м <sup>3</sup>		
Верхний слой	1.1	6.5	2436	153.4	44.86
	1.2	6.5	2433	150.5	44.00
	<b>среднее</b>				<b>44.43</b>
Нижний слой	2.1	6.5	2392	135.6	39.65
	2.2	6.5	2390	136.7	39.97
	<b>среднее</b>				<b>39.81</b>

Примечание: плиты формовались рабочей поверхностью вниз.

Из таблицы 1 видно, что прочность бетона соответствует классу по прочности В30. Следует отметить, что верхний слой дорожных плит, при изготовлении находящийся снизу, имеет прочность на 11.6 % выше нижнего слоя, что косвенно доказывает расслоение бетонной смеси и

свидетельствует о нарушении технологии формирования. Неоднородность по составу может быть вызвана использованием подвижных смесей.

Расслоение смеси можно проследить по распределению крупного заполнителя в теле бетона. Для этого поверхность среза образцов-керна предварительно тщательно промывалась водой, после чего фиксировалась на цифровую камеру. Затем полученные изображения передавались на компьютер, где при помощи программного продукта AutoCAD производилось выделение поверхности заполнителей с общего фона среза образцов кернов. Далее программный продукт производил расчет площади выделенного крупного заполнителя, и вычислялось отношение площади всех зерен крупного заполнителя к общей площади образца (рис. 1). Таким образом, полученное отношение является оценкой объемного содержания крупного заполнителя в затвердевшем бетоне.



**Рисунок 1. Пример графической обработки образца-керна затвердевшего бетона:  
а – после выделения крупного заполнителя с общего фона среза образца керна;  
б – исходная поверхность образца**

Содержание крупного заполнителя – щебня из изверженных горных пород – в бетоне находится в интервале от 28.3 % до 43.7 % по объему и от 750 до 1158.1 кг/м<sup>3</sup>, что подтверждает факт расслоения бетонной смеси. Полученные результаты согласуются с данными, полученными при определении прочности бетона.

Также одной из важнейших характеристик дорожного бетона являются параметры его порового пространства, влияющие на эксплуатационные свойства, главным образом на морозостойкость. При определении порового пространства обычно исходят из трех структурных свойств: пористости, внутренней удельной поверхности пор и разделения пор по размерам.

Водопоглощение бетона является косвенной характеристикой его пористости, поэтому было оценено водопоглощение бетона дорожных плит и дана приближенная оценка строения его порового пространства.

Полученные результаты превышают допустимое значение: согласно ГОСТ 21924 водопоглощение бетона дорожных плит не должно превышать 5 % по массе. Причем нижняя часть бетона дорожных плит превышает норму на 4.2 % , верхняя – на 18.8 %. Увеличение пористости верхнего слоя плит объясняется воздействием внешних факторов при эксплуатации.

Приближенная оценка строения порового пространства бетона получена по кинетике водопоглощения в соответствии со стандартной методикой. По результатам испытания рассчитано относительное водопоглощение по массе в момент времени  $t_1 = 0.25$  ч –  $W_1$  и  $t_2 = 1$  ч –  $W_2$ . Затем графоаналитическим методом по результатам расчета кривой насыщения и номограмме определяли параметры  $\alpha$  и  $\lambda$ , характеризующие строение порового пространства дорожного бетона. Результаты эксперимента и проведенных расчетов по опытным данным представлены в таблице 2.

Таблица 2. Водопоглощение бетона, отобранного из дорожного полотна

№ п/п	Положение керна	Водопоглощение образцов, %, через				$W_{t=0.25}$ $W_{max}$	$W_{t=1}$ $W_{max}$	Показатели пористости	
		0.25 ч ( $W_{t=0.25}$ )	1 ч ( $W_{t=1}$ )	24 ч	7 сут ( $W_{max}$ )			$\lambda$	$\alpha$
1	Верхняя часть	2.05	3.45	5.11	5.42	0.38	0.64	1.05	0.55
2		2.22	3.71	5.59	5.94	0.37	0.62	0.96	0.56
3	Нижняя часть	1.87	3.32	5.04	5.27	0.35	0.63	1.01	0.61
4		1.9	3.2	4.85	5.15	0.37	0.62	0.96	0.56

Примечание:  $W_t$  – водонасыщение образца за время  $t$ ;  $W_{max}$  – максимальное водонасыщение;  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий степень однородности капилляров по их радиусам;  $\lambda$  – средний радиус капилляров.

Показатели пористости  $\alpha$  и  $\lambda$  свидетельствуют об одинаковом поровом строении бетона дорожного полотна. При этом водонасыщение в первые минуты свидетельствует о наличии крупных пор, которые снижают морозостойкость бетона: общеизвестно, что уменьшение среднего радиуса капилляров повышает морозостойкость бетона, так как вода в таких капиллярах замерзает при более низких температурах.

Авторы [14], считают, что пропаривание изделий по более жесткому режиму приводит к увеличению открытой пористости и, как следствие, снижению морозостойкости. Поэтому полученные результаты косвенно могут свидетельствовать о нарушении режима тепловлажностной обработки при производстве дорожных плит.

Основной характеристикой долговечности дорожных плит является сохранение свойств бетона при замораживании, то есть его морозостойкость. При этом степень повреждения бетона при замораживании зависит от степени его водонасыщения [15].

Морозостойкость бетона определяли ускоренным методом (третий метод по ГОСТ 10060–2012) с нарушением количества и вида образцов. Отклонение от метода испытаний было вызвано ограничением отбора количества образцов на объекте. Результаты по потере массы образцов представлены в таблице 3 и на рисунках 2, 3.

Таблица 3. Морозостойкость бетона дорожных плит

Образец	Масса образцов, гр		
	Насыщенных по ГОСТ 10060-12, п.5.5.2	Через 5 циклов / потеря массы, %	Через 7 циклов / потеря массы, %
Нижняя часть	483.45	470.05/2.76	457.24/5.73
	476.00	465.04/2.36	448.38/6.16
Верхняя часть	478.61	464.14/3.1	456.16/4.92
	477.99	467.05/2.34	458.70/4.2

Из таблицы 3 видно, что потеря массы через 5 циклов превышает допустимые 2 %. Таким образом, образцы не выдержали марку по морозостойкости  $F_2 100$ .

Так как морозостойкость дорожного бетона – основная характеристика долговечности, рассмотрены некоторые способы ее увеличения.

Увеличение морозостойкости бетона может быть достигнуто понижением В/Ц, что объясняется в основном упрочнением структуры цементного камня и бетона, уменьшением его капиллярной пористости, которая пропорциональна снижению количества воды затворения. Еще один вариант – за счет применения воздухововлекающих добавок [16, 17].

Увеличению морозостойкости способствует ограничение максимального значения водоцементного отношения и одновременное уменьшение его главной структурной составляющей – цементного камня [18]. Однако по мнению автора [19], морозостойкость дорожного бетона более 300 циклов по II методу будет обеспечена, если расход цемента составит более  $340 \text{ кг/м}^3$ , В/Ц < 0.45 и при прочности бетона более 40 МПа.



Рисунок 2. Образцы через 5 циклов



Рисунок 3. Образцы через 7 циклов

На рисунках 2, 3 показана степень разрушения образцов после испытаний. Следует отметить, что полученные результаты согласуются с данными по водопоглощению.

Нормативные документы регламентируют обязательное использование в дорожных бетонах химических добавок пластифицирующего и воздухововлекающего действия. Уменьшение водопоглощения должно положительно отразиться на морозостойкости бетона, а воздухововлечение является одним из способов повышения морозостойкости при условии создания замкнутой пористости [20, 21].

Влияние вида пластифицирующей добавки на морозостойкость бетона показано в таблице 4.

Добавки поликарбоксилатного действия обладают большим водоредуцирующим эффектом и низким воздухововлечением, за счет чего уплотняется структура и снижается проницаемость бетона из-за отсутствия микропор, и, как следствие, повышается его морозостойкость. Однако добавки на нафталинформальдегидной основе обладают некоторым воздухововлечением, за счет чего повышается морозостойкость бетона на ее основе.

**Таблица 4. Морозостойкость и водонепроницаемость тяжелого бетона из смесей с подвижностью ПЗ-П4**

№ п/п	Класс бетона	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	Вид и расход добавки	Водонепроницаемость, марка	Морозостойкость, марка
1*	B45	420	Поликарбоксилат 1 %	W14	F300
2**	B45	410	Поликарбоксилат 0.5 %	W16	F200
3	B40	395	Поликарбоксилат 0.4 %	W14	F200
4	B30	410	Нафтал.-форм. 0.7 %	W12	F200

\* – данные Гамалий Е.А. [22]; \*\* – данные Ибрагимов Р.А. [23]

Таким образом, морозостойкость бетона не зависит от типа пластификатора (поликарбоксилатные или нафталинформальдегидные).

Другим немаловажным фактором является вид применяемого цемента. Известно, что свойства основных минералов, – гидросиликатов гидроалюминатов – образующихся в цементном камне, различны по прочности и скорости образования, а также водостойкости, что важно для морозостойкости цементного камня. Авторами [24, 25] установлено, что гидроалюминат кальция, являющийся основным минералом алюминатной фазы, характеризуется низкой водостойкостью и в воде теряет прочность.

Поэтому для бетонов с высокими требованиями по морозостойкости необходимо использовать портландцементы с содержанием трехкальциевого алюмината ( $C_3A$ ) в количестве не более 8 % по массе. Часто на это мало обращают внимание и повышают морозостойкость за счет увеличения активности цемента или его расхода. На примере трех цементов (ПЦ 600Д0 «Новоросцемент», ПЦ 500Д0 «Вольскцемент», ПЦ 500Д0 «Искитимцемент») показано влияние активности цемента и его расхода на морозостойкость бетона (табл. 5).

Во всех составах бетона применялся суперпластификатор на нафталин-формальдегидной основе, подвижность смесей П4.

**Таблица 5. Влияние вида цемента на морозостойкость бетона**

Вид цемента	Класс бетона по прочности	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	Потеря прочности после 200 циклов, %
ПЦ 600Д0 «Новоросцемент»	B30	370	8.5
ПЦ 500Д0 «Вольскцемент»	B25	384	3.4
ПЦ 500Д0 «Искитимцемент»	B25	387	11.2

Как видно из полученных данных, при равном расходе цемента потеря прочности после 200 циклов попеременного замораживания и оттаивания в солях варьируется от 3.4 до 11.2 %. Причем увеличение марки бетона по прочности на сжатие не всегда увеличивает морозостойкость. Выше уже говорилось об отрицательном влиянии алюминатов кальция, которое видно на примерах ПЦ 500Д0 «Вольскцемент» и ПЦ 500Д0 «Искитимцемент» с содержанием трехкальциевого алюмината  $C_3A$  соответственно 4 % и 10 %.

Для более детального установления причин разрушения дорожных плит исследовались продукты гидратации бетона.

Определение фазового состава бетона плит проводилось на дифрактометре Bruker D8 (табл. 6) по дифрактограммам (угловой диапазон  $110 \leq 2\theta \leq +169$ , абсолютная погрешность измерения углов 0.01 град.).

**Таблица 6. Рентгенофазовый анализ**

Phase Name	Wt. %	Phase Name	Wt. %
$C_3S$ monoclinic (NISHI)	7.3	Ettringit	3.6
$C_2S$ beta (MUMME)	1.9	hydroalumite	7.4
$C_3A$ cubic	0.3	Calcite	16.0
$C_4AF$	1.4	Albite	20.5
Quartz	13.3	Phlogopite 1M Mica	17.2
Gypsum	0.6	Actinolite	2.0
Portlandite	8.6		

Как видно из результатов химического анализа бетона (табл. 6), имеется большое содержание алюминатной фазы в цементном камне (этtringит и AFm-фаза).

Процесс образования гидроалюминатов кальция (AFm) [26, 27] при твердении цемента сопровождается контракцией (химической усадкой), которая значительно больше, чем при гидратации алита и белита. Увеличение контракции ведет к увеличению пористости бетона и, следовательно, к снижению морозостойкости. При замерзании бетона в жидкой среде (вода или растворы солей) происходит растворение метастабильных кристаллогидратов гидросульфалюминатов кальция и выкристаллизация более стабильных веществ. Это приводит к снижению прочности бетона и сопротивляемости морозному разрушению.

На основании полученных данных рентгенофазового анализа можно сделать вывод, что бетон дорожных плит содержит высокоалюминатный цемент.

Количество хлора в составе бетона определяли с помощью иономера лабораторного И-160МИ, предназначенного для измерения показателя активности и концентрации ионов хлора. Максимально допустимое содержание хлоридов в бетоне, выраженное в процентах хлорид-ионов от массы цемента, не должно превышать для преднапряженных конструкций 0.1 % (табл. 7).

**Таблица 7. Содержание хлорид-ионов в составе бетона**

№	Содержание хлорид-ионов, мг/л	В перерасчете от расхода цемента*, %	Требования по ГОСТ 31384–2008
№1 – верхний слой дорожной плиты	33.5	0.168	до 0.1 % от массы цемента
№2 – нижний слой дорожной плиты	27.8	0.139	до 0.1 % от массы цемента
№3 Бетон В40**	1.43	0.007	до 0.1 % от массы цемента

Примечания:

\* Расход цемента приняли по СНиП 82-02-95 для класса бетона по прочности В30.

\*\* Ц = 450 кг/м<sup>3</sup>, Щ = 1050 кг/м<sup>3</sup>, П = 850 кг/м<sup>3</sup>, СП1 = 0,6 % от массы цемента, В/Ц = 0.45.

Из таблицы 7 видно, что в представленных образцах количество хлора превышает нормативное значение.

По нашему мнению, высокое содержание ионов хлора может быть вызвано двумя факторами: обработкой дорожного покрытия противогололедными реагентами, содержащими соединения хлора, или использованием хлорсодержащих компонентов при производстве бетонной смеси для дорожных плит.

### Заключение

Таким образом, на основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

- 1) при производстве дорожных плит нарушена технология их формования, о чем свидетельствуют данные соотношения крупного заполнителя по высоте плиты и наличие открытой пористости;
- 2) в составе бетона использовались материалы, не отвечающие нормативным требованиям для дорожных изделий, а именно портландцемент с высоким содержанием алюминатной фазы.

Таким образом, на примере дорожных плит, эксплуатировавшихся в течение 6 месяцев (осенне-зимний период) при малой интенсивности движения автомобильного транспорта (стоянка машин) установлены факторы, повлекшие разрушение бетона плит. Основная причина потери эксплуатационных свойств – низкая морозостойкость бетона дорожных плит.

Для обеспечения требования по морозостойкости дорожных изделий необходим тщательный контроль за материалами и параметрами их производства.

*Работа выполнена по заданию №7.1955.2014/К в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации.*

### Литература

1. Шейнин А.М., Эккель С.В. Обеспечение качества бетонной смеси и бетона при строительстве монолитных покрытий и оснований // Наука и техника в дорожной отрасли. 2003. №2 (25). С. 18–21.
2. Aguirre A. M., Mejía de Gutiérrez R. Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions // Materiales de Construcción. 2013. Vol. 63(309). Pp. 7–38.

### References

1. Sheynin A.M., Ekkel S.V. Obespecheniye kachestva betonnoy smesi i betona pri stroitelstve monolitnykh pokrytiy i osnovaniy [Ensuring the quality of concrete mixture and concrete in the construction of monolithic coatings and bases]. *Science and technology in the road sector*. 2003. No. 2(25). Pp. 18–21. (rus)
2. Aguirre A.M., Mejía de Gutiérrez R. Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions. *Materiales de Construcción*. 2013. Vol. 63(309), Pp. 7–38.

Морозов Н.М., Красникова Н.М., Боровских И.В. Факторы, влияющие на разрушение бетона дорожных плит

3. Li Y. J., Gong Y. L., Yin J. Strength and Durability of High Performance Road Concrete Containing Ultra-Fine Fly Ash // *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vols. 99–100. Pp. 126–1268.
4. Du X. Y., Li Z., Shao B. Experimental Study of the Performance of C60 Pavement Concrete // *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 331. Pp. 527–530.
5. Shi X., Xie N., Fortune K., Gong J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 30. Pp. 125–138.
6. Haitao Y., Shizhu T. Preparation and properties of high-strength recycled concrete in cold areas // *Materiales de Construcción*. 2015. Vol. 65(318). e 050. doi: 10.3989/mc.2015.03214.
7. Zhou S. B., Shen A. Q. The Relationship between Concrete Road Performance and Salt Frost // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 857. Pp. 271–276.
8. Штарк И., Вихт Б. Долговечность бетона. Киев: Оранта, 2004. 301 с.
9. Zhang J. X., Kong X. J., Wang C. Study on Freezing-and-Thawing Durability of Cement Concrete Based on Experimental Investigation of Air-Void Parameters // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 857. Pp. 212–221.
10. Ибрагимов Р.А., Пименов С.И., Изотов В.С. Влияние механохимической активации вяжущего на свойства мелкозернистого бетона // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. №2. С. 63–69.
11. Красникова Н.М., Морозов Н.М., Боровских И.В., Хозин В.Г. Опыт внедрения мелкозернистых бетонов при производстве дорожных плит // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. №7. С. 46–54.
12. Romero H.L., Enfedaque A., Gálvez J.C., Casati M.J. Complementary testing techniques applied to obtain the freeze-thaw resistance of concrete // *Materiales de Construcción*. 2015. Vol. 65(317). e048. doi: 10.3989/mc.2015.01514.
13. Kobayashi M., Nakakuro E., Kodama K., Negami S. Freeze-thaw resistance of superplasticized concrete // *Development in the use of superplasticizers. Special publication 68 ACI-Detroit*. 1981. Pp. 269–282.
14. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние. 1989. 128 с.
15. Алексеев С.Н., Иванов Ф.М., Модры С., Шисль П. Долговечность бетона в агрессивных средах: Совм. Изд. СССР–ЧССР–ФРГ. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
16. Красникова Н.М., Морозов Н.М., Хохлаков О.В., Хозин В.Г. Оптимизация состава цементного бетона для аэродромных покрытий // *Известия КазГАСУ*. 2014. №2. С. 166–172.
17. Трофимов Б.Я., Горбунов С.П. Дорожные бетоны повышенной морозостойкости // *Цемент и его применение*. 2011. №6. С. 66–69.
18. Шестоперов С.В. Долговечность бетона транспортных сооружений. М.: Транспорт, 1966. 500 с.
19. Подмазова С.А. Проектирование составов бетона для транспортных сооружений // *Бетон и железобетон – пути развития. Научные труды 2-ой Всероссийской (Международной) конференции по бетону и железобетону. Том 1. Пленарные доклады*. М.: Дипак, 2005. 440 с.
20. Якупов М.И., Морозов Н.М., Боровских И.В., Хозин В.Г. Модифицированный мелкозернистый бетон для возведения монолитных покрытий взлетно-посадочных полос аэродромов // *Известия КазГАСУ*. 2013. №4. С. 257–261.
21. Spiratos N., Page M., Mailvaganam N.P., Malhotra V.M., Jolicoeur C. Superplasticizers for Concrete. *Fundamentals, Technology and Practice*. Ottawa (Canada). 2003. 322 p.
3. Li Y.J., Gong Y.L., Yin J. Strength and Durability of High Performance Road Concrete Containing Ultra-Fine Fly Ash. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vols. 99–100. Pp. 1264–1268.
4. Du X.Y., Li Z., Shao B. Experimental Study of the Performance of C60 Pavement Concrete. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 331. Pp. 527–530.
5. Shi X., Xie N., Fortune K., Gong J. Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Construction and Building Materials*. 2012. No. 30. Pp. 125–138.
6. Haitao Y., Shizhu T. Preparation and properties of high-strength recycled concrete in cold areas. *Materiales de Construcción*. 2015. Vol. 65(318). e 050. doi: 10.3989/mc.2015.03214.
7. Zhou S.B., Shen A.Q. The Relationship between Concrete Road Performance and Salt Frost. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 857. Pp. 271–276.
8. Shtark I., Vikht B. Dolgovechnost betona [Durability of concrete]. Kiyev. Oranta. 2004. 301 p. (rus)
9. Zhang J.X., Kong X.J., Wang C. Study on Freezing-and-Thawing Durability of Cement Concrete Based on Experimental Investigation of Air-Void Parameters. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 857. Pp. 212–221.
10. Ibragimov R.A., Pimenov S.I., Izotov V.S. Vliyanie mekhanokhimicheskoy aktivatsii vyazhushchego na svoystva melkozernistogo betona [The effect of mechanochemical activation of binder on the properties of fine-grained concrete]. *Magazine of civil engineering*. 2015. No. 2. Pp. 63–69. (rus)
11. Krasnikova N.M., Morozov N.M., Borovskikh I.V., Khozin V.G. Opyt vnedreniya melkozernistykh betonov pri proizvodstve dorozhnykh plit [Experience of introduction of fine-grained concrete when producing road plates]. *Magazine of civil engineering*. 2014. No. 7. Pp.46–54. (rus)
12. Romero H.L., Enfedaque A., Gálvez J.C., Casati M.J. Complementary testing techniques applied to obtain the freeze-thaw resistance of concrete. *Materiales de Construcción*. 2015. Vol. 65(317). e048. doi: 10.3989/mc.2015.01514.
13. Kobayashi M., Nakakuro E., Kodama K., Negami S. Freeze-thaw resistance of superplasticized concrete. Development in the use of superplasticizers. *Special publication 68 ACI-Detroit*. 1981. Pp. 269–282.
14. Sheykin A.E., Dobshits L.M. Tsementnyye betony vysokoy morozostoykosti [Cement concrete with high frost resistance]. Leningrad: Stroyizdat, Leningr. otdeleniye, 1989. 128 p. (rus)
15. Alekseyev S.N., Ivanov F.M., Modry S., Shissl P. Dolgovechnost betona v agressivnykh sredakh [Durability of concrete in aggressive environments]. Moscow: Stroyizdat. 1990. 320 p. (rus)
16. Krasnikova N.M., Morozov N.M., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Optimizatsiya sostava tsementnogo betona dlya aerodromnykh pokrytiy. [To optimize the composition of cement concrete for airfield pavements]. *News of the KSAUE*. 2014. No. 2. Pp. 166–172. (rus)
17. Trofimov B.Ya., Gorbunov S.P. Dorozhnyye betony povyshennoy morozostoykosti. [Road concrete of heightened frost resistance]. *Cement and its application*. 2011. No. 6. Pp. 66–69. (rus)
18. Shestoperov S.V. Dolgovechnost betona transportnykh sooruzheniy. [Durability of concrete and reinforced concrete structures]. Moscow. Transport. 1966. 500 p. (rus)
19. Podmazova S.A. Proyektirovaniye sostavov betona dlya transportnykh sooruzheniy [Design of concrete mixtures for transportation structures]. *Concrete and reinforced concrete – development path. Proceedings of 2 all-Russian (International) conference on concrete and reinforced concrete*. Vol 1. Moscow. Dipak. 2005. 440 p. (rus)

Morozov N.M., Krasnikova N.M., Borovskikh I.V. Factors affecting the deterioration of concrete pavement slabs

22. Гамалий Е.А. Комплексные модификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов и активных минеральных добавок для тяжелого конструкционного бетона. Автореф. дисс. канд. технич. наук. Челябинск. 2009. 18 с.
23. Изотов В.С., Ибрагимов Р.А. Влияние комплексной добавки на долговечность тяжелого бетона // Известия КазГАСУ. 2011. №2. С.190–194.
24. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. Л.: Стройиздат, 1983. 132 с.
25. Шестоперов С.В. Долговечность бетона транспортных сооружений. М.: Транспорт, 1966. 500 с.
26. Грищенко Р.О. Термодинамические свойства кристаллических фаз, образующихся при получении глинозема методом Байера. Дисс. .... канд. хим. наук. 2014. 121 с.
27. Шейнин А.М. Цементобетон для дорожных и аэродромных покрытий. М.: Транспорт, 1991. 151 с.
20. Yakupov M.I., Morozov N.M., Borovskikh I.V., Khozin V.G. Modifitsirovanny melkozernisty beton dlya vozvedeniya monolitnykh pokrytiy vzletno-posadochnykh polos aerodromov [Modified fine-grained concrete for construction of monolithic coverings of runways of airfields]. *News of the KSAUE*. 2013. No. 4. Pp. 257–261. (rus)
21. Spiratos M.P., Mailvaganam N.P., Malhotra V.M., Jolicoeur C. Superplasticizers for Concrete. Fundamentals, Technology and Practice. Ottawa (Canada). 2003. 322 p.
22. Gamaliy E.A. *Kompleksnyye modifikatory na osnove efirov polikarboksilatov i aktivnykh mineralnykh dobavok dlya tyazhelogo konstruktсионного бетона* [Complex modifiers on the basis of ether polycarboxylates and active mineral additives for heavy structural concrete]. Abstract of thesis of candidate of technical sciences: 05.23.05. Chelyabinsk. 2009. 18 p. (rus)
23. Izotov V.S., Ibragimov R.A. Vliyaniye kompleksnoy dobavki na dolgovechnost tyazhelogo betona [The influence of complex additive on heavy-aggregate concrete durability]. *News of the KSAUE*. 2011. No. 2. Pp.190–194. (rus)
24. Kuntsevich O.V. *Betony vysokoy morozostoykosti dlya sooruzheniy Kraynego Severa* [Concretes with high frost resistance for the plants of the far North]. Leningrad. Stroyizdat. 1983. 132 p. (rus)
25. Shestoperov S.V. *Dolgovechnost betona transportnykh sooruzheniy* [Durability of concrete and reinforced concrete structures]. Moscow. Transport. 1966. 500 p. (rus)
26. Grishchenko R.O. *Termodinamicheskiye svoystva kristallicheskikh faz, obrazuyushchikhsya pri poluchenii glinozema metodom Bayera* [Thermodynamic properties of crystalline phases formed during the obtaining of alumina by the Bayer's method]. The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of chemical Sciences: 02.00.04, 2014. 121 p. (rus)
27. Sheynin A.M. *Tsementobeton dlya dorozhnykh i aerodromnykh pokrytiy* [Concrete for road and airfield pavements]. Moscow. Transport. 1991. 151 p. (rus)

*Николай Михайлович Морозов,*  
+7(903)3144226; эл. почта: nikola\_535@mail.ru

*Nikolai M. Morozov,*  
+7(903)3144226; nikola\_535@mail.ru

*Наталья Михайловна Красникова,*  
89274298559; эл. почта: knm0104@mail.ru

*Natalia M. Krasnikova,*  
+7(927)4298559; knm0104@mail.ru

*Игорь Викторович Боровских,*  
+7(843)5104734; эл. почта:  
borigor83@gmail.com

*Igor V. Borovskikh,*  
+7(843)5104734; borigor83@gmail.com

© Морозов Н.М., Красникова Н.М., Боровских И.В., 2015

doi: 10.5862/MCE.59.4

## Напряженно-деформированное состояние дорожных плит в процессе производства и эксплуатации в условиях Западной Сибири

### Stress and strain state of road slabs during production and use in the Western Siberia conditions

*Д-р техн. наук, профессор В.В. Бабков,  
аспирант Р.А. Юмагулов,  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет, г. Уфа, Россия  
инженер Р.С. Кильдибаев,  
ООО «Георекон», г. Уфа, Россия*

*V.V. Babkov,  
R.A. Yumagulov,  
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa,  
Russia  
R.S. Kildibaev,  
Georekon JSC, Ufa, Russia*

**Ключевые слова:** дорожные плиты; дорожная  
одежда жесткого типа; строительство дорог

**Key words:** road slabs; rigid road revetment; road  
construction

**Аннотация.** В строительстве автомобильных дорог в сложных гидрогеологических и климатических условиях Западной Сибири используются сборные железобетонные дорожные плиты. За более чем полувековой период эксплуатации они доказали свои достоинства и в настоящее время продолжают пользоваться большим спросом. В связи с этим задача развития дорожной сети в регионах Западной Сибири и осваиваемых районах Крайнего Севера с покрытием из сборных железобетонных плит остается актуальной. Дорожные железобетонные преднапряженные плиты ПДН, как показал многолетний опыт их производства и эксплуатации, подвержены трещинообразованию уже на этапе заводского изготовления. Для исследования причин образования трещин выполнен анализ напряженно-деформированного состояния дорожных плит в программно-вычислительном комплексе ANSYS 14.0. Выявлено, что существующая схема расположения рабочей напрягаемой арматуры по действующей типовой серии 3.503.1–91 (вып. 1) способствует развитию поперечных напряжений растяжения  $\sigma_y$  в торцевой части плит и в зонах, примыкающих к ней. Возникающие растягивающие напряжения могут инициировать раскрытие продольных трещин в процессе эксплуатации в условиях многократных повторных воздействий, характерных для условий эксплуатации дорожной плиты. По результатам анализа предложено техническое решение по оптимизации армирования дорожных плит, снижающее негативное влияние растягивающих напряжений в торцевых участках плит от усилия предварительного обжатия. Оптимизация сводится к повышению дисперсности распределения напрягаемой арматуры в сечении при сохранении мощности предварительного напряжения по усилению обжатия, что приводит к снижению поперечных напряжений растяжения до приемлемого уровня.

**Abstract.** Precast concrete road slabs are used for auto-road construction in the severe hydrogeologic and climatic conditions of Western Siberia. The advantages of precast concrete road pavements have been proved by more than half a century of use, which is confirmed by the current steady demand for this type of product. The problem of developing the precast concrete road system in the Western Siberian and the Far North regions is therefore still a critical task. The long experience of manufacturing and using prestressed concrete road slabs showed that they are at risk of crack formation not only when the road pavement is used but also at the manufacturing stage. To explore the reason of crack formation, stress and strain state analysis of road slabs was performed using the ANSYS 14.0 software. It was revealed that the existing prestressed reinforcement layout of the functional standard series enables the development of transverse tensile stress  $\sigma_y$  in slab ends and adjoining parts.

The occurring tensile stress can initiate longitudinal cracks in operation by multiple repeated exposure typical for the road slab usage conditions. Based on the results of the analysis, a technical solution optimizing road slab reinforcement was suggested to reduce the detrimental effect of tensile stress in slab ends from the prestressing force. The optimization involves increasing the distribution dispersability of tensile reinforcement at cross-sections by the prestressing force without sacrificing its prestress capacity, resulting in reducing tensile transverse stress to acceptable levels.

### **Введение**

Начиная с 60-х годов прошлого столетия при строительстве автомобильных дорог в сложных гидрогеологических и климатических условиях Западной Сибири используются сборные железобетонные дорожные плиты. В основном строительство ведется нефтегазодобывающими компаниями для освоения месторождений, а также развития автотранспортного сообщения между населенными пунктами в регионах присутствия. Следует отметить, что около 80 % запасов углеводородного сырья Российской Федерации залегает на территориях, где строительство дорог должно производиться с применением дорожных одежд жесткого типа, и наиболее оправданным является вариант использования сборных железобетонных плит [1]. Однако многолетний опыт их производства и эксплуатации выявил проблемы, связанные с пониженной трещиностойкостью уже на этапе заводского изготовления. Проблемы трещиностойкости и долговечности дорожных железобетонных плит изучались в ряде исследований, затрагивавших влияние температурных деформаций, усадочных деформаций, которые возникают при твердении бетона вследствие потери влаги [2, 3]. Имеются исследования трещиностойкости зрелого тяжелого бетона, более или менее завершившего структурообразование [3–7], а также отработавшего значительный срок эксплуатации [3, 8, 9].

В данной статье представлены результаты исследования влияния предварительного напряжения арматуры на трещиностойкость дорожных плит в процессе изготовления и эксплуатации. Для исследования причин образования трещин выполнен анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) дорожных плит в программно-вычислительном комплексе ANSYS 14.0.

Обзор литературы по данному вопросу показал, что исследования НДС железобетонных элементов проводились многими авторами [7, 10–14], но исследований НДС конкретно дорожных плит, в том числе на стадии заводского изготовления, в данных публикациях не представлено. Установлено, что существующая схема расположения рабочей напрягаемой арматуры в действующей типовой серии 3.503.1–91 вызывает возникновение и развитие поперечных напряжений растяжения  $\sigma_{ty}$  в торцевой части плит и зонах примыкающей к ней на всех стадиях жизненного цикла конструкции, что определяет общую недостаточную трещиностойкость. Возникающие при этом растягивающие поперечные напряжения могут инициировать образование и раскрытие продольных трещин в процессе эксплуатации в условиях циклических нагрузок от автомобильного транспорта.

По результатам анализа предложено техническое решение по оптимизации армирования дорожных плит, снижающее негативное влияние поперечных растягивающих напряжений  $\sigma_{ty}$  в торцевых участках плит от усилия предварительного обжатия. Одновременно повышается несущая способность конструкции, что актуально в современных условиях возросшей интенсивности автомобильных нагрузок [15].

### **Конструктивные решения типовых дорожных плит и вероятные причины образования трещин**

Наибольшее применение в дорожных одеждах жесткого типа из сборных плит получила предварительно напряженная железобетонная плита типа ПДН размерами 6.0 x 2.0 x 0.14 м (L x B x h), разработанная на базе аэродромной плиты ПАГ-14 [16]. Отличительной особенностью плит типа ПДН относительно ПАГ-14 на момент разработки являлось уменьшенное количество рабочей арматуры по площади вследствие воздействия меньших расчетных нагрузок на покрытие автодороги [16].

Заводы железобетонных конструкций, производящие сборные железобетонные плиты для строительства автомобильных дорог в сложных гидрогеологических условиях Западной Сибири, используют действующую документацию на производство данных конструкций – альбом «Серия 3.503.1–91. Выпуск 1. Плиты. Рабочие чертежи» (Разработан: Союздорпроект Минтрасстроя. Утвержден: Минтрансстрой СССР 04.12.89. Введен в действие 01.06.90). Конструкция плиты размерами 6.0 x 2.0 x 0.14 м (L x B x h) запроектирована как преднапряженная в одном направлении ортотропная конструкция на упругом винклеровском основании с эквивалентным коэффициентом постели не менее  $k = 10 \text{ кгс/см}^3$  ( $100 \text{ МН/м}^3$ ) и соответствующим модулем упругости основания  $E = 100 \text{ МПа}$  для расчетной нормативной нагрузки 50 кН на колесо трехосного автомобиля. В расчете учтена возможность расположения на плите одного, двух и четырех колес (задней двухосной тележки автомобиля и смежных колес двух автомобилей) при коэффициенте надежности по нагрузке  $\gamma_f = 1.1$  и коэффициенте динамичности  $\mu = 1 + 0.2$ .

Следует отметить, что в настоящее время в действующем ГОСТ Р 52748–2007 «Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения» значения нормативных нагрузок от автотранспортных средств повышены по сравнению с нагрузками, принятыми в расчет на момент освоения производства плит существующей серии. Плита ПДН запроектирована в основном варианте по рабочей напрягаемой арматуре 10 стержнями  $\varnothing 12$  арматурной стали класса AV(At-V) или 10 стержнями  $\varnothing 14$  арматурной стали класса AIV(At-IV) с симметричным размещением верхнего и нижнего ряда стержней по толщине плиты при расстоянии от центра стержней рабочей арматуры до края сечения 40 мм (рис. 1).

Следует отметить, что конструкция плиты с однонаправленно расположенной рабочей предварительно напряженной арматурой не соответствует требованиям п. 10.3.8 СП 63.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 52–01–2003). Несоответствие заключается в расстояниях между тремя средними стержнями этой арматуры в 540 мм, принятыми в серии. Существующее расположение не обеспечивает равномерность распределения напряжений сжатия в бетоне по ширине сечения плиты и обуславливает развитие поперечных напряжений растяжения  $\sigma_{ty}$  (рис. 1а). В итоге это зачастую приводит к развитию продольных трещин в железобетоне плит, которые и наблюдаются на практике на стадии заводского производства конструкций вследствие превышения расчетных сопротивлений бетона на растяжение. Блокирование поперечных растягивающих напряжений и развития продольных трещин в плите поперечной ненапрягаемой арматурой в виде стержней  $\varnothing 8$  арматурной стали класса AIII на концевых участках плит с дополнительным сеточным двухрядным армированием арматурой  $\varnothing 5$  класса Вр-I в пролете не достигается. При нагружении этой ненапрягаемой арматуры в поперечном направлении на уровне ~15% от ее расчетных сопротивлений исчерпывается предельная растяжимость бетона.

$$(\varepsilon_{bult} \approx 10 \cdot 10^{-5}):$$

$$\sigma_s = \varepsilon'_b * E_s = 10 \cdot 10^{-5} * 2 \cdot 10^5 \approx 20 \text{ МПа}$$

Здесь  $E_s \approx 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$  – модуль упругости арматурной стали.

Предельно допустимое расстояние между стержнями продольной рабочей арматуры согласно требованиям п. 10.3.8 СП 63.13330.2012 должно составлять не более 200 мм.

Образование продольных трещин при больших расстояниях между стержнями рабочей арматуры возможно уже на стадии отпуска натяжения арматуры. При этом появление начальных трещин на этой стадии наиболее вероятно на торцах в средних сечениях между наиболее удаленными стержнями рабочего армирования. Еще более вероятно появление указанных трещин на стадии съема плиты из формы в случае формования ее лицевой поверхностью вниз. При этом указанные трещины могут выходить на лицевую поверхность во время съема плиты и ее такелажа со сменой ориентации лицевой поверхности вверх в силу того, что на этой стадии происходит сложение растягивающих напряжений, формирующихся при отпуске натяжения арматуры и изгибе от собственного веса плиты (рис. 1б, в).

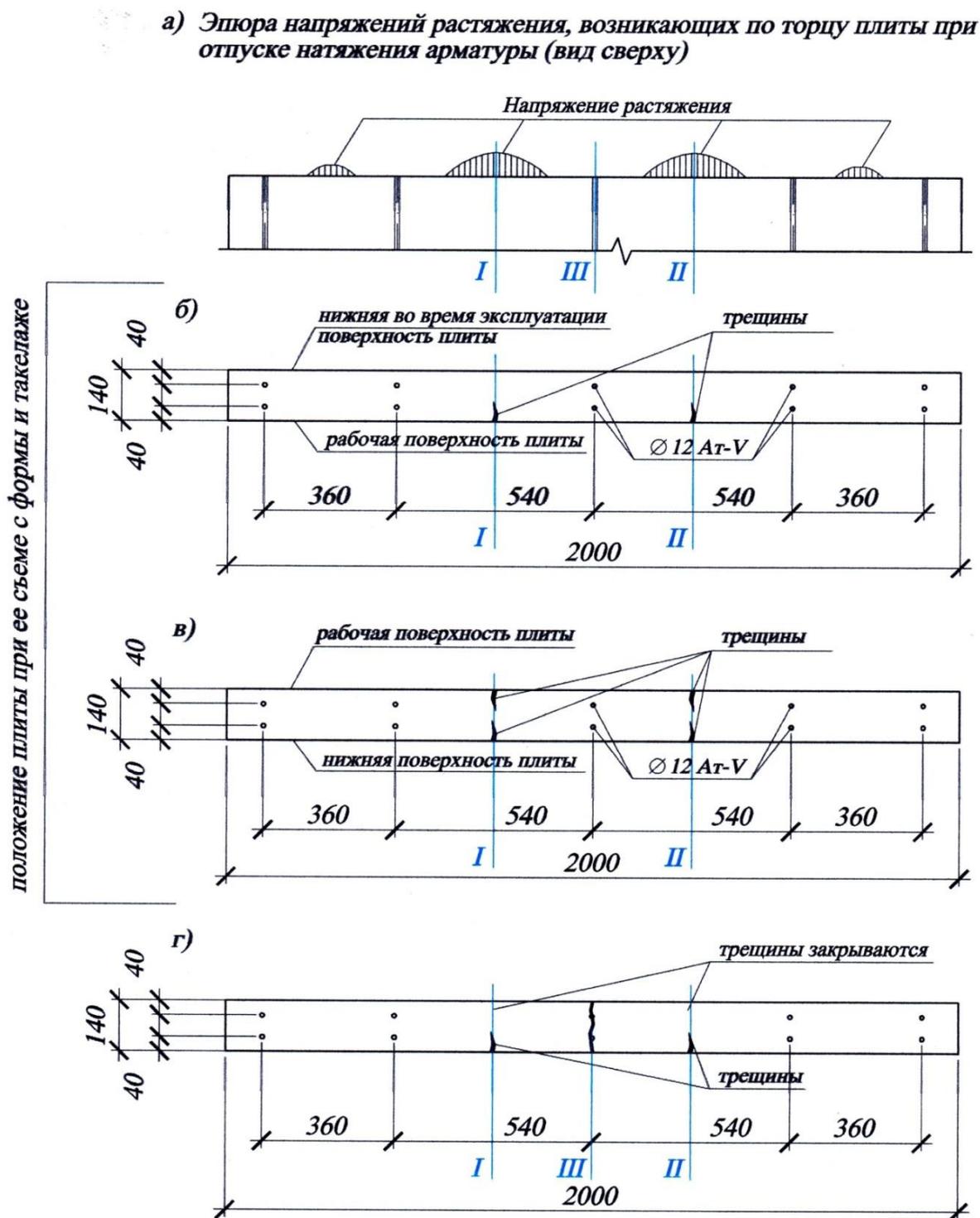


Рисунок 1. Положения и напряженное состояние плиты при съеме с опалубочной формы: а) напряжения растяжения по торцу плиты при отпуске натяжения арматуры; б) 1 цикл съема с рабочей поверхностью плиты «снизу»; в) 2 цикл с поворотом плиты на 180° и рабочей поверхностью «сверху»; г) возникновение сквозных трещин по оси плиты после длительной эксплуатации в дороге

## Анализ напряженно-деформированного состояния типовых дорожных плит

Описанные выше определения наиболее опасных мест возникновения трещин выполнены с использованием комплекса ANSYS 14.0 в поле и в двух характерных сечениях: по торцу плиты (линии А–А, В–В) и на расстоянии 0.6 м от торца (линии С–С, D–D) (рис. 2, рис. 2.1).

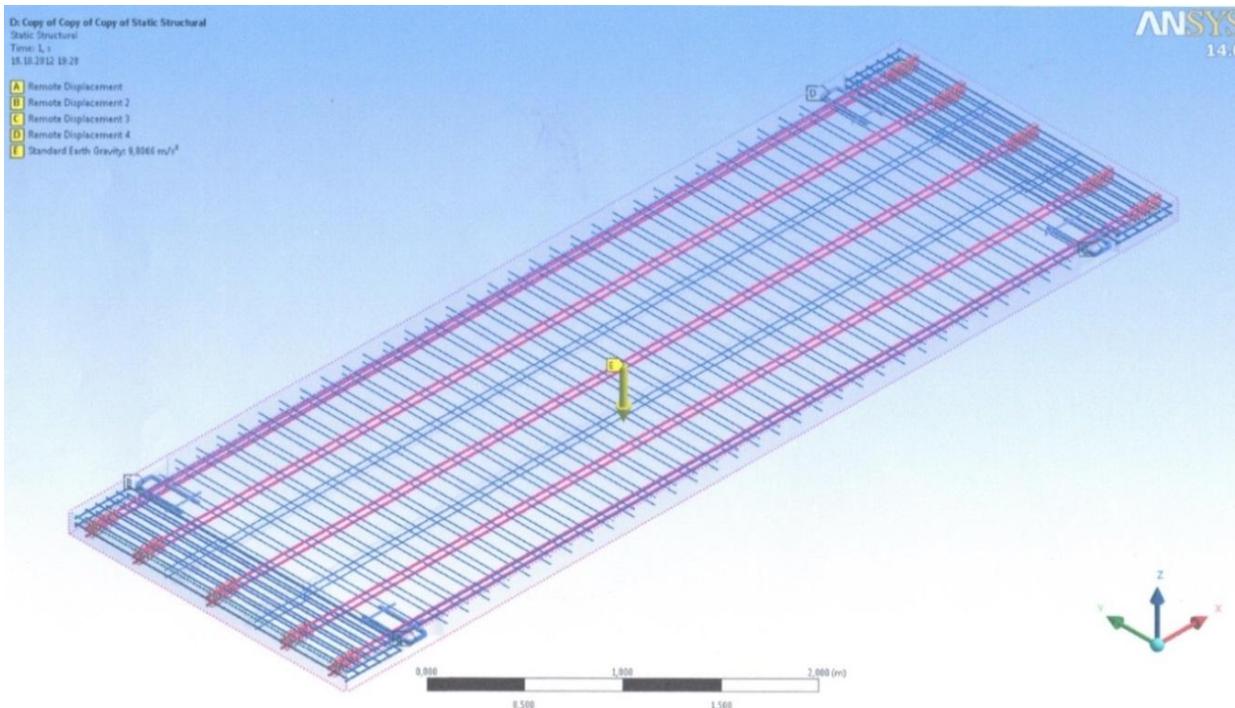


Рисунок 2. Армирование и расчетная модель плиты ПДН, производимой по действующей документации

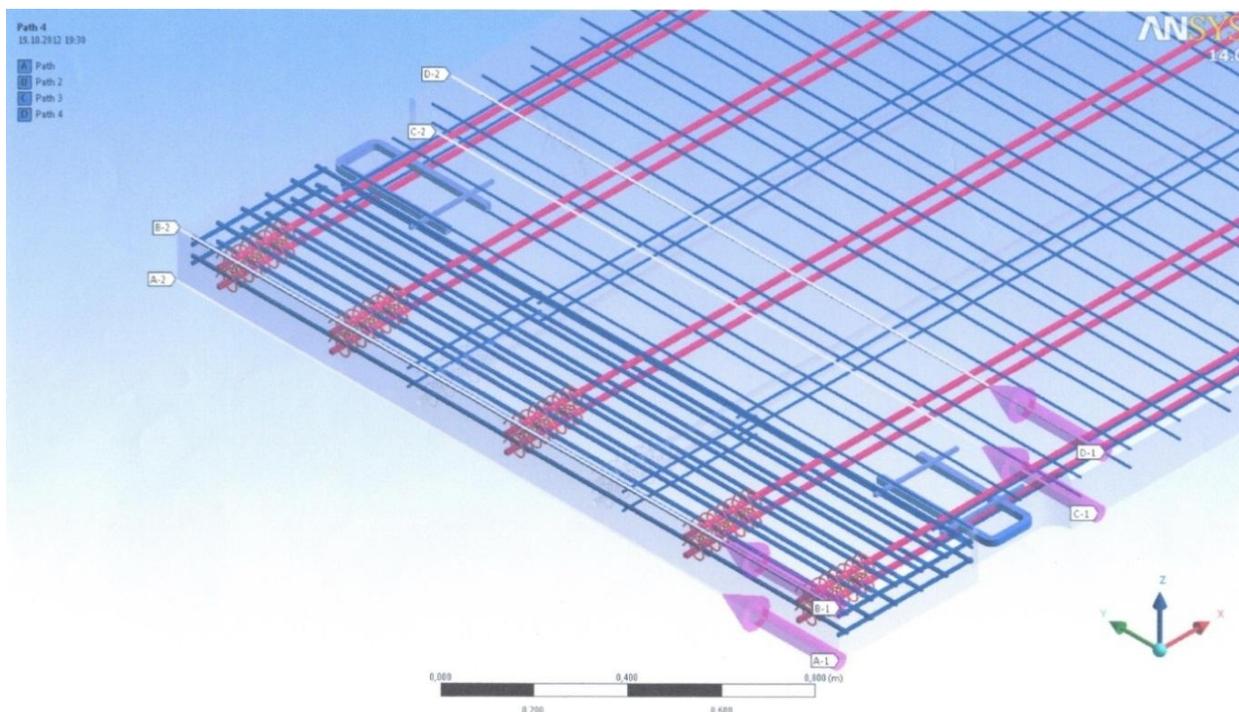


Рисунок 2.1. Армирование и расчетная модель плиты ПДН, производимой по действующей документации (увеличенный вид армирования торцевой части)

Математическое моделирование работы железобетонной конструкции основано на методе конечных элементов. Решение задачи в нелинейной постановке осуществлялось методом Ньютона – Рафсона. Для описания процесса разрушения хрупких материалов использовалась модель Виллама – Варнке [17], тип используемого конечного элемента 65. Для решения задачи были приняты следующие допущения:

- 1) все элементы конструкции связаны неразрывно;
- 2) при любых деформациях сохраняется структурная целостность элементов конструкции;
- 3) разрушение бетона приводит к образованию блочной системы, которая под внешними воздействиями деформируется как целое структурное образование, то есть разрушенный материал находится в консолидированном состоянии.

На рисунке 3 приведены эпюры растягивающих нормальных напряжений  $\sigma_{ty}$  для стадии нагружения плиты «отпуск натяжения арматуры + нагрузка на стадии подъема плиты с поддона за 4 монтажные петли» в двух названных сечениях. Линии В и Д соответствуют прогибу плиты и дополнительному пригрузу напряжений растяжения  $\sigma_{ty}$  нижней поверхности плиты; линии А и С – противоположной поверхности с частичной разгрузкой поверхности по напряжениям  $\sigma_{ty}$  от собственного веса плиты.

Картина НДС отражает значительную перегрузку плиты по растягивающим напряжениям  $\sigma_{ty}$  на участках между удаленными в средней части плиты стержнями с уровнем нагружения на осевое растяжение  $\sigma_{ty} = 3$  МПа, что в 1.5 раза превышает предел прочности бетона класса В27.5 на растяжение  $\sigma_{t,ult}$  (СП 52–101–03):

$$\sigma_{t,ult} = R_{bt,n} / (1 + \chi_y) = 1.70 / (1 + 1.64 * 0.135) = 2.18 \text{ МПа}$$

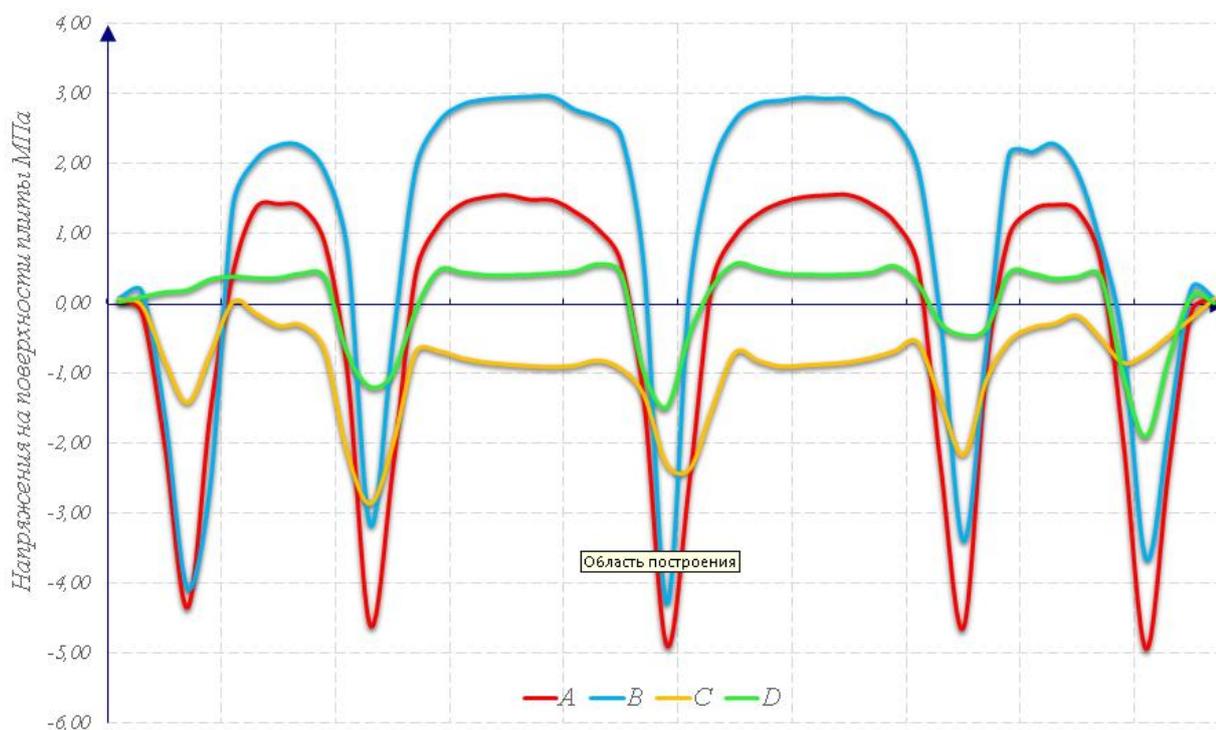


Рисунок 3. Напряженное состояние торца плиты и сечения на расстоянии 0.6 м от торца по напряжениям  $\sigma_y$

При расчете в комплексе ANSYS 14.0 модуль упругопластичности бетона принят для непродолжительного действия нагрузки с учетом коэффициента упругопластических деформаций  $\nu = 0.45$  (табл. 35 СНиП 2.03.04–84\*). Анализ НДС указывает на то, что доля напряжений растяжения при изгибе плиты от собственного веса составляет  $\approx 20\%$  полных напряжений, включая возникающие при отпуске натяжения арматуры. Максимальные напряжения растяжения по торцу плиты между 1 и 2 предварительно напряженными стержнями близки к пределу прочности бетона, что подтверждается в реальности отсутствием трещин в этих зонах на стадии изготовления плиты. Таким образом, анализ НДС, выполненный с учетом упругопластического состояния бетона, подтверждает высокую вероятность образования трещин на торцах плиты на стадии ее заводского изготовления и такелажа.

Стоит обратить внимание на то, что в сечении плиты уже на расстоянии 0.6 м от торца напряжение растяжения  $\sigma_{ty}$  практически обнуляется или даже меняет знак на сжатие (линии С, D на рисунке 3). Умеренное растяжение бетона в этом сечении связано исключительно с прогибом плиты от собственного веса (линия D на рисунке 3) при такелаже в одном из двух положений и не достигает предела прочности для принятого класса бетона.

### Оптимизация армирования дорожных плит

В целях снижения опасных напряжений предложено два варианта решений. Первый вариант основан на апробации усиления плиты введением в ослабленные сечения I-I и II-II в действующем проекте спаренных ненапряженных стержней  $\varnothing 12$  мм арматурной стали класса АIII. Второй – на введении в проблемные сечения I-I и II-II дополнительно сдвоенных стержней напрягаемой арматуры  $\varnothing 12$  мм арматурной стали класса Ат-V, что в некоторой степени улучшает схему армирования плиты в свете требований п. 10.3.8 СП 63.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 52–01–2003) по размещению продольных стержней рабочей арматуры по ширине плиты с учетом ее толщины (рис. 4).

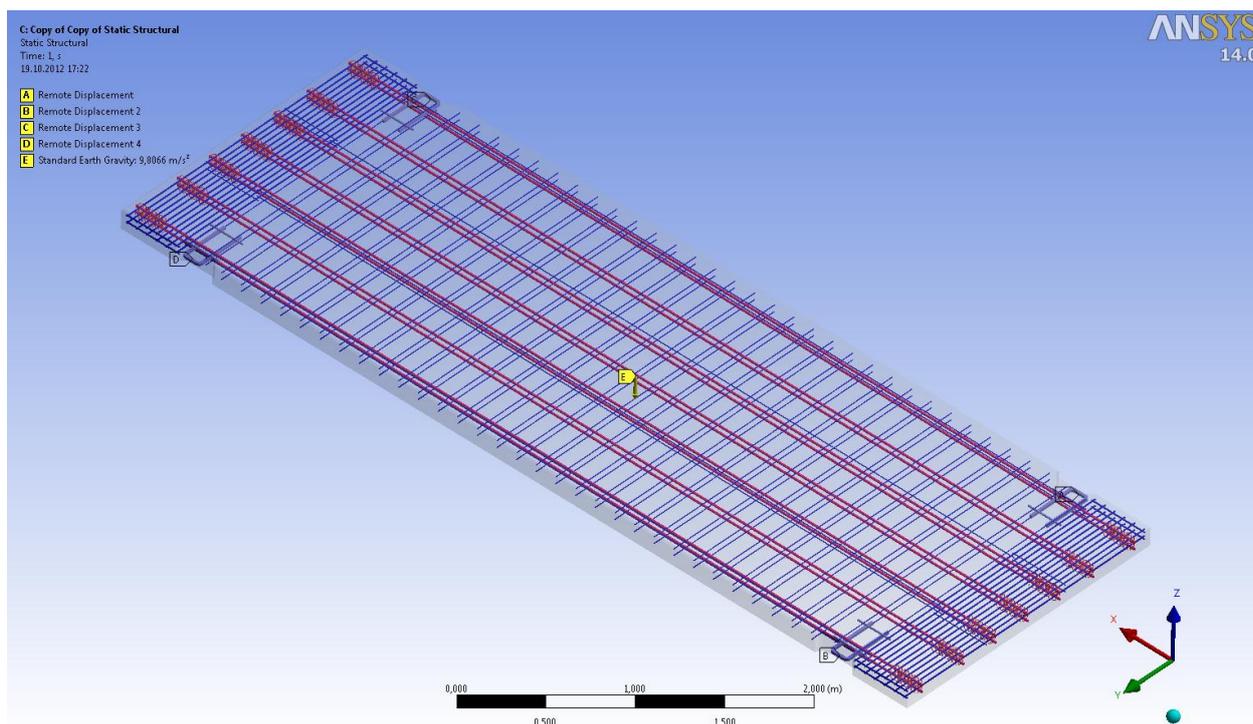


Рисунок 4. Армирование и расчетная модель плиты с рациональным армированием

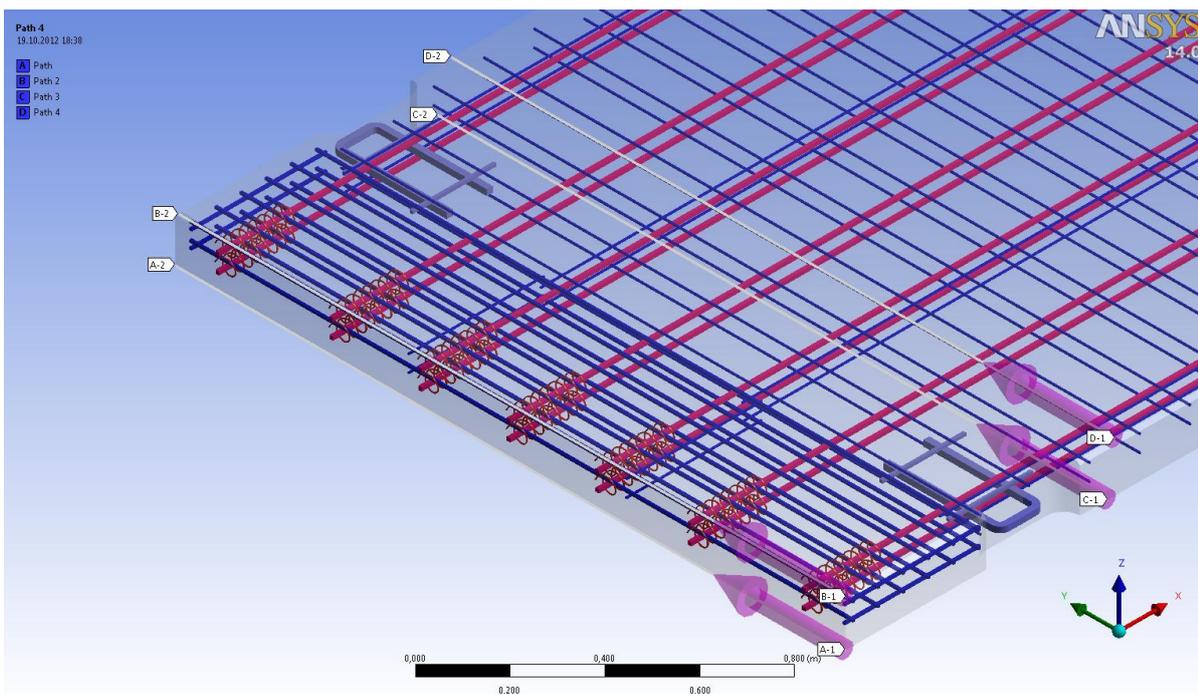


Рисунок 4.1. Армирование и расчетная модель плиты с рациональным армированием (увеличенный вид армирования торцевой части)

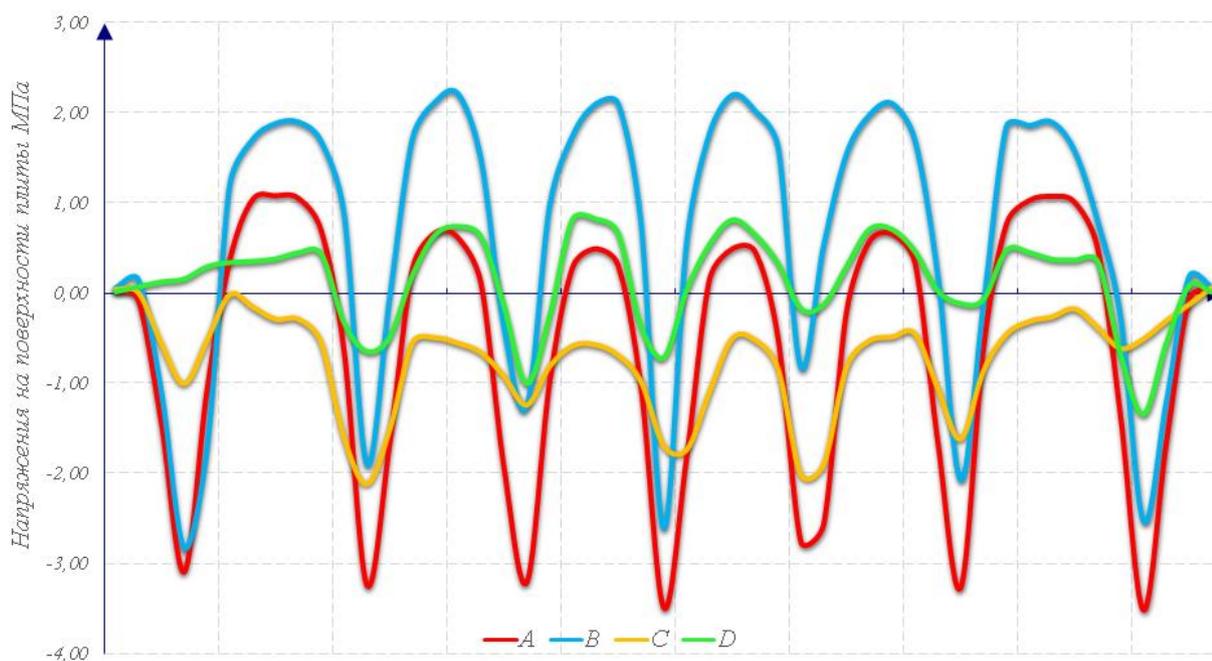


Рисунок 5. Напряженное состояние плиты с рациональным размещением рабочей арматуры

Анализ НДС плиты ПДН в программном комплексе ANSYS 14.0 показал, что повышение дисперсности распределения напрягаемой арматуры в сечении (увеличение числа стержней продольного армирования) при сохранении мощности предварительного напряжения по усилию обжатия снизило значения поперечных напряжений растяжения до  $\sim 2.0$  МПа (рис. 5), что находится в пределах прочности на осевое растяжение для бетона данного класса. В данном случае возможны и другие пути повышения трещиностойкости конструкций плит, к примеру, использование стальной фибры [18–21], но, учитывая возросшие нагрузки от автомобильного транспорта и существующую технологию изготовления плит ПДН, следует признать повышение дисперсности стержневого армирования оптимальным решением.

Таким образом, можно ожидать, что данный вариант армирования в виде 14 стержней  $\varnothing 12$  мм арматурной стали класса Ат-V при сохранении количества ненапрягаемой арматуры по серии обеспечит трещиностойкость плиты на стадии ее изготовления и одновременно повысит несущую способность и трещиностойкость при эксплуатации.

### *Некоторые предложения по улучшению условий эксплуатации старых дорожных плит на действующих дорогах*

В настоящее время при эксплуатации плит с проектным армированием в составе дороги напряжения, возникающие при отпуске натяжения арматуры на бетон и такелаже плиты, будут складываться с силовыми напряжениями от автомобильной нагрузки. При этом наряду с уязвимыми в силу удаленности от зон обжатия сечениями I-I и II-II опасным становится сечение III-III (рис. 1г) по оси плиты. При двухполосном встречном движении ось средней из трех двухметровых по ширине плит в составе дороги будет нагружена вдвое интенсивнее по числу циклов нагружения и по абсолютной нагрузке по сравнению с крайними.

Средняя плита, в связи с этим, окажется расколота сквозной трещиной III-III (рис. 1г) с последующей работой двух практически самостоятельных блоков шириной около 1 м, связанных между собой поперечной ненапрягаемой арматурой в виде стержней  $\varnothing 8$  АIII на крайних участках и двух сеток  $\varnothing 5$  Вр-I с шагом проволочек 150 мм в пролете (рис. 1г).

Такие пары конструкций оказываются работоспособными в реальных условиях, что и наблюдается на дорогах Западной Сибири. Полезной при этом будет обработка трещин III-III в плитах одним из вариантов жидкой полимеризующейся гидроизоляции в целях защиты рабочей арматуры от коррозии. Может быть рекомендована «Славянка изоляционная», представляющая собой однокомпонентный битумно-полимерный состав. Готовый к применению материал обладает высокими адгезионными свойствами, образует эластичное нетоксичное покрытие без запаха, после высыхания мастичная пленка устойчива к ударным нагрузкам как при положительных, так и при отрицательных температурах. Альтернативный вариант – мастика или герметик марки Ижора (Ижора МБР-Г-90). Данные материалы производятся в Ленинградской области.

### *Выводы*

1. Анализ напряженно-деформированного состояния позволил выявить зоны образования трещин в торцевой части типовых дорожных плит в связи с неравномерным распределением напряжений сжатия по ширине сечения плиты после отпуска усилия обжатия на бетон и сопутствующих им опасных поперечных напряжений растяжения  $\sigma_{ty}$ .

2. Существующее расположение стержней рабочей напрягаемой арматуры в действующей типовой серии не обеспечивает равномерность распределения напряжений сжатия в бетоне по ширине сечения плиты и не отвечает современным требованиям нормативных документов. Это приводит к развитию поперечных напряжений растяжения  $\sigma_{ty}$ , значительно превышающих прочность бетона на осевое растяжение.

3. С целью снижения поперечных растягивающих напряжений при торцевых зонах плит предложено повышение дисперсности распределения напрягаемой рабочей стержневой арматуры в сечении плиты при сохранении мощности предварительного напряжения по усилию обжатия. Это решение приводит к снижению поперечных растягивающих напряжений в торцевой части плиты до 2.0 МПа, что находится в пределах прочности на осевое растяжение для бетона проектного класса.

4. Данное решение актуально в современных условиях эксплуатации дорог, в том числе в связи с увеличением грузоподъемности транспорта и интенсивности автомобильных перевозок. Применение плит с увеличенным с 5 до 7 рядов рабочим армированием повлечет за собой повышение эксплуатационного ресурса и долговечности сборных дорожных покрытий.

## Литература

1. Промышленно-строительное обозрение №123 март 2010. Технологии и материалы для транспортного строительства. Дороги без дураков [Электронный ресурс]. URL: [http://www.stroy puls.ru/vipusk/detail.php?article\\_id=31319](http://www.stroy puls.ru/vipusk/detail.php?article_id=31319) (дата обращения 15.02.2014).
2. Левицкий Е.Ф., Чернигов В.А. Бетонные покрытия автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1988. 288 с.
3. Johnston D. P., Surdahl R.W. Influence of Mixture Design and Environmental Factors on Continuously Reinforced Concrete Pavement Cracking // Journal of the Transportation Research Board. 2007. №2020. Pp. 83–88.
4. Полак А.Ф., Бабков В.В., Андреева Е.П. Твердение минеральных вяжущих веществ. Уфа: Башкиргоиздат, 1990. 215 с.
5. Дибров Г.Д., Фоменко В.К. Природа возникновения внутренних напряжений в дисперсных структурах // Тезисы докладов и сообщения Всесоюзного совещания «Гидратация и твердение вяжущих». Уфа, 1978. С. 251–267.
6. Курбатов В.Л. Влияние воздухоовлечения на трещиностойкость дорожных бетонов // Сборник статей по материалам XXIX международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике». №12 (25). Новосибирск: СибАК, 2013. 208 с.
7. Ахметзянов Ф.Х., Радайкин О.В. К определению зависимостей параметров поверхностных трещин в бетонных объемных элементах // Вестник ТГАСУ. 2008. №1. С. 65–73.
8. Янковский Л.В. К вопросу оценки стойкости бетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия климата // Вестник ТГАСУ. 2013. №1. С. 1250–138.
9. Носов В.П. Цементобетонные покрытия автомобильных дорог. Прогнозирование повреждений на основе математического моделирования. М.: МАДИ, 2013. 227 с.
10. Бартоломей М.Л., Труфанов Н.А. О применении пакета ANSYS для исследования деформирования здания с учетом трещинообразования // Вестник ПГТУ. 2009. №1. С. 15–21.
11. Редикульцев Е.А. Численное исследование поведения изгибаемых железобетонных элементов при помощи программного комплекса ANSYS // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. 2009. №2. С. 84–87.
12. Демьянушко И.В., Стаин В.М., Стаин А.В. Применение метода конечных элементов для расчета бетонной плиты жесткого дорожного покрытия // Сборник научных трудов «Вопросы строительной механики и надежности машин и конструкций». М., 2012. С. 5–15.
13. Dahmani L., Khenane A., Kacia S. Crack identification in reinforced concrete beams using Ansys Software // Strength of Materials. 2010. Vol. 42. №2. Pp. 141–153.
14. Fanning P. Nonlinear Models of Reinforced and Post-tensioned Concrete Beams // Electronic Journal of Structural Engineering. 2001. №2. Pp. 111–119.
15. Бабков В.В., Селиверстов С.Н., Юмагулов Р.А. Опыт производства и применения железобетонных преднапряженных плит серии ПДН Холдинговой компании «Башбетон» в строительстве дорог Западной Сибири // Строительные материалы. 2014. №3. С. 15–17.
16. Глушков Г.И., Бабков В.Ф., Медников И.А. и др. Жесткие покрытия аэродромов и автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1987. 255 с.

## References

1. *Promyshlennno-stroitelnoye obozreniye №123 mart 2010. Tekhnologii i materialy dlya transportnogo stroitelstva. Dorogi bez durakov* [Technologies and materials for vehicle construction. Roads without fools] [online]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://www.stroy puls.ru/vipusk/detail.php?article\\_id=31319](http://www.stroy puls.ru/vipusk/detail.php?article_id=31319) (accessed: 15.02.2014). (rus)
2. Levitskiy Ye.F., Chernigov V.A. *Betonnyye pokrytiya avtomobilnykh dorog* [Concrete pavement of highways]. Moscow. Transport. 1988. 288 p. (rus)
3. Johnston D. P., Surdahl R.W. Influence of Mixture Design and Environmental Factors on Continuously Reinforced Concrete Pavement Cracking. *Journal of the Transportation Research Board*. 2007. No. 2020 of the National Academics, Washington, D.C. Pp 83-88.
4. Polak A.F., Babkov V.V., Andreyeva Ye.P. *Tverdeniye mineralnykh vyazhushchikh veshchestv* [The hardening of mineral binders]. Ufa. Bashkniogoizdat. 1990. 215 p. (rus)
5. Dibrov G.D., Fomenko V.K. Priroda vozniknoveniya vnutrennikh napryazheniy v dispersnykh strukturakh [The origin of internal stress in dispersed structures]. *Tezisy dokladov i soobshcheniya Vsesoyuznogo soveshchaniya «Gidratatsiya i tverdeniye vyazhushchikh»* [Theses of reports all-Union meeting "Hydration and hardening binders"]. Ufa. 1978. Pp. 251–267. (rus)
6. Kurbatov V.L. Vliyaniye vozdukhovovlecheniya na treshchinostoykost dorozhnykh betonov [The influence of air entrainment on the concrete road crack]. *Sbornik statey po materialam XXIX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Tekhnicheskiye nauki – ot teorii k praktike»* [A collection of articles on materials of the XXIX international scientific-practical conference "Technical Sciences – from theory to practice"]. No. 12 (25). Novosibirsk. SibAK. 2013. 208 p. (rus)
7. Akhmetzyanov F.Kh., Radaykin O.V. K opredeleniyu zavisimostey parametrov poverkhnostnykh treshchin v betonnykh obyemnykh elementakh [To the definition of dependencies between parameters of surface cracks in concrete volume elements]. *Vestnik of TSUAB*. 2008. No. 1. Pp. 65–73. (rus)
8. Yankovskiy L.V. K voprosu otsenki stoykosti betonnykh konstruksiy, ekspluatiruyushchikhsya v usloviyakh vozddeystviya klimata [To the question of assessing the durability of concrete structures operated in the conditions of impact of climate change]. *Vestnik of TSUAB*. No. 1. 2013. Pp. 125–138. (rus)
9. Nosov V.P. *Tsementnobetonnyye pokrytiya avtomobilnykh dorog. Prognozirovaniye povrezhdeniy na osnove matematicheskogo modelirovaniya* [Concrete pavement of roads. Prediction of damages on the basis of mathematical modeling]. Moscow. MADI. 2013. 227 p. (rus)
10. Bartolomey M.L., Trufanov N.A. O primeneniye paketa ANSYS dlya issledovaniya deformirovaniya zdaniya s uchetom treshchينوobrazovaniya [About application of ANSYS to study the deformation of a building with consideration of cracking]. *Vestnik PGTU*. 2009. No. 1. Pp. 15–21. (rus)
11. Redikultsev Ye.A. Chislennoye issledovaniye povedeniya izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov pri pomoshchi programmnogo kompleksa ANSYS [Numerical study of bending behavior of reinforced concrete elements using the software ANSYS]. *Akademicheskiy vestnik URALNIIPROEKT RAASN*. 2009. No. 2. Pp. 84–87. (rus)
12. Demyanushko I.V., Stain V.M., Stain A.V. Primneniye metoda konechnykh elementov dlya rascheta betonnoy plity zhestkogo dorozhnogo pokrytiya [The finite element method is used to calculate the concrete slabs of rigid pavement]. *Sbornik nauchnykh trudov «Voprosy stroitel'noy mekhaniki i nadezhnosti mashin i konstruksiy»* [Problems of structural mechanics and machines and structures reliability:

Бабков В.В., Юмагулов Р.А., Кильдибаев Р.С. Напряженно-деформированное состояние дорожных плит в процессе производства и эксплуатации в условиях Западной Сибири

17. Willam K.J. Constitutive Model for Triaxial Behavior of Concrete // *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*. 1975. №9. Pp. 174–191.
18. Graeff A.G., Pilakontas K., Neocleous K., Maria Vania N.N. Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres // *Engineering Structures*. 2012. Vol. 45. Pp. 385–395.
19. Nobilia A., Lanzonia L., Tarantino A.M. Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47. Pp. 888–895.
20. Lanzonia L., Nobilib A., Tarantino A. M. Performance evaluation of a polypropylene-based draw-wired fibre for concrete structures // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 28. Pp. 798–806.
21. Zhang T., Xu Y., Lin Z. The Application of Fiber Reinforced Concrete in Cement Concrete Pavement // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 634–638. Pp. 2094–2097.
- Collection of papers]. 2012. Pp. 5–15. (rus)
13. Dahmani L., Khennane A., Kacia S. Crack identification in reinforced concrete beams using Ansys Software. *Strength of Materials*. 2010. Vol. 42. No. 2. Pp. 141–153.
14. Fanning P. Nonlinear Models of Reinforced and Post-tensioned Concrete Beams. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2001. No. 2. Pp. 111–119.
15. Babkov V.V., Seliverstov S.N., Yumagulov R.A. Opyt proizvodstva i primeneniya zhelezobetonnykh prednapryazhennykh plit serii PDN Kholdingovoy kompanii «Bashbeton» v stroitelstve dorog Zapadnoy Sibiri [Experience in the production and use of prestressed concrete slabs PD series of the Holding company "Bashbeton" in the construction of roads in Western Siberia]. *Construction materials*. 2014. No. 3. Pp. 15–17. (rus)
16. Glushkov G.I., Babkov V.F., Mednikov I.A. *Zhestkiye pokrytiya aerodromov i avtomobilnykh dorog* [Rigid pavements of airfields and roads]. Moscow. Transport. 1987. 255 p. (rus)
17. Willam K.J. Constitutive Model for Triaxial Behavior of Concrete. *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*. 1975. No. 9. Pp. 174–191.
18. Graeff A.G., Pilakontas K., Neocleous K., Maria Vania N.N. Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. *Engineering Structures*. 2012. Vol. 45. Pp. 385–395.
19. Nobilia A., Lanzonia L., Tarantino A. M. Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47. Pp. 888–895.
20. Lanzonia L., Nobilib A., Tarantino A. M. Performance evaluation of a polypropylene-based draw-wired fibre for concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 28. Pp. 798–806.
21. Zhang T., Xu Y., Lin Z. The Application of Fiber Reinforced Concrete in Cement Concrete Pavement. *Advanced Materials Research*. 2013. Vols 634–638. Pp. 2094–2097.

**Вадим Васильевич Бабков,**  
+79279570880; эл. почта:  
babkov.ugntu@gmail.com

**Руфат Айратович Юмагулов,**  
+79279570880; эл. почта:  
yumagulovra@gmail.com

**Ринат Салаватович Кильдибаев,**  
+79196003057; эл. почта: rbstroi@mail.ru

**Vadim V. Babkov,**  
+79279570880; babkov.ugntu@gmail.com

**Rufat A. Yumagulov,**  
+79279570880; yumagulovra@gmail.com

**Rinat S. Kildibaev,**  
+79196003057rbstroi@mail.ru

© Бабков В.В., Юмагулов Р.А., Кильдибаев Р.С., 2015

doi: 10.5862/MCE.59.5

## Структура и свойства текстильно-армированного бетона Structure and properties of textile reinforced concrete

*Студент А.А. Волкова,  
студент А.В. Пайков,  
канд. техн. наук, доцент О.Н. Столяров,  
инженер С.Г. Семенов,  
д-р техн. наук, зав. каф. Б.Е. Мельников,  
Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, Санкт-  
Петербург, Россия*

*A.A. Volkova,  
A.V. Paykov,  
O.N. Stolyarov,  
S.G. Semenov,  
B.E. Melnikov,  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic  
University, Saint Petersburg, Russia*

**Ключевые слова:** текстильно-армированный бетон; основовязанные полотна; структура

**Key words:** textile-reinforced concrete; warp-knitted fabrics; mechanical properties; structure

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования структуры и свойств образцов текстильно-армированного бетона. Для изготовления образцов были использованы два вида высокопрочных армирующих полотен из стеклянных и углеродных ровингов. В рамках исследования были проведены испытания полученных образцов на поперечный изгиб, определен их предел прочности при изгибе и эффективность армирования. Показано, что образцы с текстильным армированием обладают более высокими прочностными характеристиками по сравнению с неармированными. Кроме того, проанализировано деформационное поведение армированного бетона. Преимущество заключается в большей остаточной несущей способности, позволяющей сохранять целостность конструкции без разрушения после предельных механических воздействий.

**Abstract.** In this paper the structure and properties of textile-reinforced concrete were investigated. Two types of high strength reinforcing fabrics made of glass and carbon rovings were used in this study. The samples of textile-reinforced concrete were produced. The mechanical properties of the developed samples were determined via a three-point bending test. The maximum flexural strength and reinforcement efficiency were calculated. It was found that the samples with textile reinforcement have higher strength characteristics as compared to nonreinforced concrete. Furthermore, the deformation behavior of reinforced concrete was analyzed. The advantage is in higher residual load-bearing capacity, which allows maintaining the integrity of the structure.

### Введение

В настоящее время высокопрочные текстильные материалы находят все новые применения для армирования элементов конструкций в строительной отрасли [1–4]. Для их изготовления в основном применяются высокопрочные и высокомодульные волокна и нити, такие как стеклянные, базальтовые, углеродные и др. [2]. В сочетании с цементной матрицей они образуют новый класс конструктивных строительных материалов – текстильно-армированный бетон, который сегодня считается одним из самых перспективных материалов, используемых в строительстве. По сравнению с традиционными строительными материалами текстильно-армированный бетон обладает рядом неоспоримых преимуществ, таких как высокая коррозионная стойкость, меньший вес конструкций и т. д. Однако его применение зачастую ограничено дороговизной исходных армирующих материалов, вследствие чего использование такого бетона в конструкциях массивных сооружений экономически нецелесообразно. Поэтому такое армирование находит эффективное применение в различных конструкциях, сочетающих в себе легкость, малые габариты и прочность – например, в сэндвич-панелях и различных перегородках, а также может применяться при реконструкции различных бетонных сооружений.

### Литературный обзор

Применение высокопрочных текстильных материалов для армирования бетонных конструкций дает множество преимуществ, одним из которых является изготовление достаточно Волкова А.А., Пайков А.В., Столяров О.Н., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Структура и свойства текстильно-армированного бетона

тонких бетонных элементов по сравнению с традиционным железобетоном. В дополнение ко всему этому текстильная арматура обладает большей гибкостью и драпируемостью. В качестве армирующего компонента для композитного бетона чаще всего используют щелочестойкие стекловолокна (AR-glass), а также базальтовые и углеродные волокна. Данные наполнители могут применяться как в виде рубленого волокна, так и в виде полотен с открытыми ячейками. В отличие от дискретных волокнистых наполнителей, именно в текстильных полотнах могут быть широко реализованы свойства высокопрочных и высокомодульных нитей. Механизм работы армирующего волокна в цементной матрице сильно отличается от действующего в полимерной матрице из-за более низкого предельного удлинения первой, которое значительно меньше удлинения волокон. Поэтому в цементных композитах матрица разрушается раньше, чем будут полностью реализованы прочностные свойства волокнистого армирования. В полимерных композитах матрица обычно более пластичная, чем волокно. Существенным преимуществом также является то, что волокно будет способно воспринимать нагрузку уже после образования трещины и разрушения матрицы.

Армирующая структура для бетона представляет собой плоский или пространственный каркас, состоящий из ячеек определенной геометрической формы, которые способствуют проникновению цементной матрицы в структуру. Ячейки могут иметь различную форму: прямоугольник, ромб, треугольник и др. Размеры и форма ячеек также могут варьироваться. Чаще всего встречаются прямоугольные ячейки с размерами 8, 10, 16, 20 мм. От размеров ячеек полотна зависит сцепление с бетонной матрицей, и, как следствие, механические свойства при равном объеме армирования. Чем больше ячейка, тем выше вероятность того, что внутри бетона не будет пустот, снижающих его прочностные характеристики.

За последние два десятилетия развитию данного направления было посвящено значительное число работ. В работе [3] описывается системный подход к изучению усиленного волокнистыми композитами бетона. В общем случае он включает:

- 1) испытание материала;
- 2) анализ свойств;
- 3) расчет наилучшего соотношения прочности и трещиностойкости;
- 4) статистический анализ и расчет на прочность.

В работах [4–6] описаны методы измерений и применения конструкций из усиленного композитами бетона, а также способы производства армирующих нитей и полотен. В [7–9] рассматривается зависимость прочностных характеристик композита от структурных параметров армирующих ровингов и полотен. В исследованиях [10, 11] описывается применение полимеров в композитном бетоне. В [12] рассмотрена возможность применения углеродных волокнистых материалов и композитов на их основе в бетонных конструкциях. Различные способы усиления композитами, такие как заливка бетона в опалубку из полотна и использование смеси стальной и неметаллической фибры, рассмотрены в [13, 14]. В исследованиях [15–18] изучаются различные модели, такие как компьютерная модель композитной конструкции из бетона, модели, описывающие поведение конструкции под влиянием продолжительных нагрузок и коррозии. Существующие способы усиления железобетонных конструкций пролетных строений, включая усиление композиционными материалами на основе углеродных волокон в полимерном связующем, исследованы в работе [19]. Увеличение прочности бетонных конструкций может быть также осуществлено с применением преднапряженных текстильных полотен [20, 21]. В целом, технология применения армирующей стеки из высокопрочных ровингов обладает рядом преимуществ по сравнению с железобетоном. С помощью гибкой сетки можно создать плоский или пространственный армирующий каркас необходимой формы, который будет легко монтироваться в форме для изготовления определенных бетонных элементов.

Из проанализированных данных можно заключить, что основные преимущества использования высокопрочного текстиля для армирования бетона состоят в:

- повышении прочностных характеристик, особенно в случаях больших нагрузок на тонкие элементы;
- повышении долговечности конструкций и снижении расходов других материалов, которые используют в строительстве для получения таких же прочностных характеристик, что и при применении композитов;
- увеличении несущей способности конструктивных элементов;
- повышении трещиностойкости и меньших размерах трещин в случае их образования и др.

## Постановка задачи и описание исследования

Основная цель данной работы состояла в исследовании возможности применения высокопрочных армирующих полотен из стеклянных и углеродных ровингов и изучении их влияния на механические свойства текстильно-армированного бетона. Для решения этой задачи необходимо было установить, как прочностные характеристики текстильно-армированного бетона зависят от структуры и состава волокон. В работе были исследованы два вида армирующих структур, представляющих собой сетчатоподобные основовязанные полотна, изготовленные из стеклянных и углеродных нитей. Характеристики исследуемых образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики армирующих материалов

№	Армирующий ровинг				Полотно	
	В продольном направлении	В поперечном направлении	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости, МПа	Размер ячейки	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>
1	Щелочестойкий стеклянный (AR-glass), 4К, 2400 текс	Щелочестойкий стеклянный (AR-glass)	1024.0 ± 60.3	66.5±2.0	8 × 8 мм	620
2	Углеродный (на основе ПАН волокна), 24К, 1600 текс		2093.0 ± 73.4	173.0±4.3	8 × 8 мм	510

Структура армирующего полотна представляет собой сетку с прямоугольными ячейками из проложенных в двух направлениях армирующих ровингов, соединенных дополнительной тонкой провязывающей полиэфирной нитью с линейной плотностью 15.6 текс. Исследуемая структура включала стеклянные (образец 1) или углеродные (образец 2) ровинги в продольном направлении и только стеклянные ровинги в поперечном направлении. Размер ячейки составлял 8 × 8 мм, при этом на 50 мм приходилось 6 ровингов. Структуры используемых армирующих полотен из стеклянных и углеродных ровингов представлены на рисунках 1а и 1б соответственно.

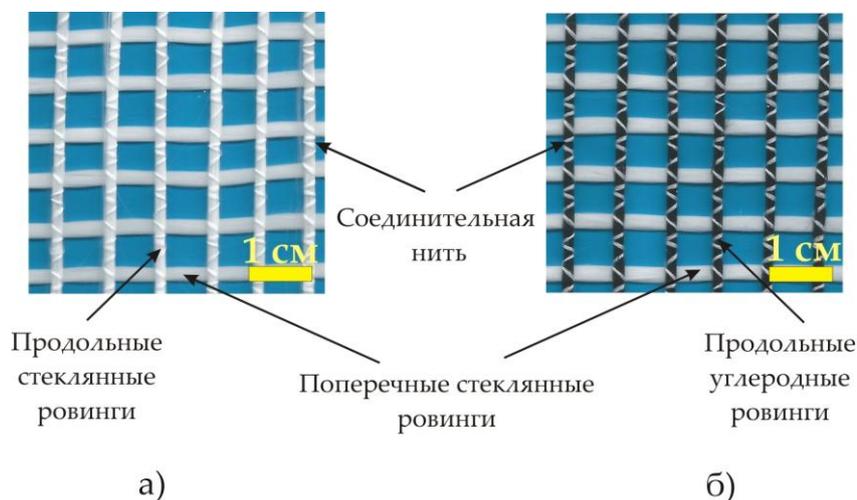


Рисунок 1. Структура армирующих полотен

Для изготовления опытных образцов текстильно-армированного бетона использовалась цементная смесь (предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток не менее 20 МПа), заполнитель – кварцевый песок с максимальной фракцией 0.63 мм. Размеры форм прямоугольного сечения для изготовления образцов составили 56 × 200 × 20 мм. В каждый образец на расстоянии 3 мм от нижнего и верхнего краев было заложено по 2 полотна в продольном направлении ровингов симметрично срединной плоскости образца. Для испытаний каждого из видов армирования была изготовлена серия из 5 образцов, которые были испытаны на поперечный (трехточечный) изгиб в возрасте 28 суток (рис. 2). Расстояние между крайними опорами составляло 150 мм.

По результатам испытаний была определена величина предела прочности при изгибе как отношение максимального изгибающего момента при разрушении образца к осевому моменту сопротивления сечения при изгибе:

$$\sigma = \frac{M_{\text{изг}}^{\text{max}}}{W_z}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{изг}}^{\text{max}}$  – максимальный изгибающий момент, кН\*м;  $W_z$  – осевой момент сопротивления, м<sup>3</sup>.



Рисунок 2. Испытание армированного образца на трехточечный изгиб

### Результаты испытаний

На рисунке 3 представлены зависимости прогиба от напряжения поперечного изгиба образцов армированных цементных композитов. Из приведенных диаграмм видно, что характер поведения неармированного и армированного образцов различен. Кроме того, он существенно зависит от вида армирующей нити. Исследуемые образцы армированного бетона демонстрируют схожий характер поведения. Начальный участок деформирования характеризуется линейностью свойств с последующим переходом в участок с незначительной нелинейностью. После этого появляется первая поперечная трещина. В случае образцов из стеклоровинга величина этой нагрузки является максимальной на диаграмме поперечного изгиба. Образец из углеродного ровинга демонстрирует нагрузку при изгибе, соответствующую первой трещине и примерно равную прочности неармированного бетона. Затем наблюдается рост напряжений при изгибе за счет сопротивляемости углеродных нитей. Этот процесс происходит скачкообразно с образованием еще нескольких максимальных пиков. Величины предела прочности при изгибе представлены на рисунке 4а.

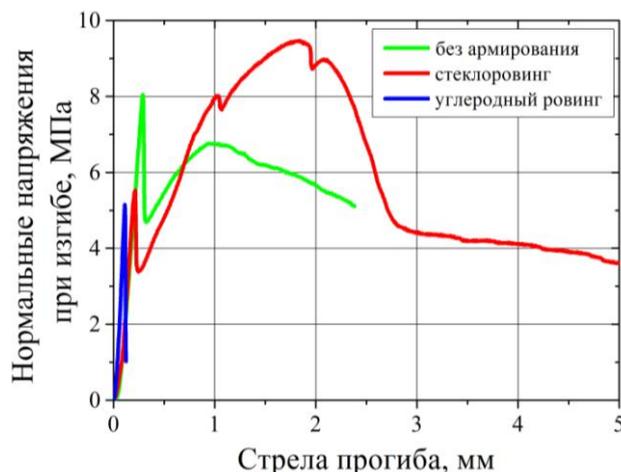


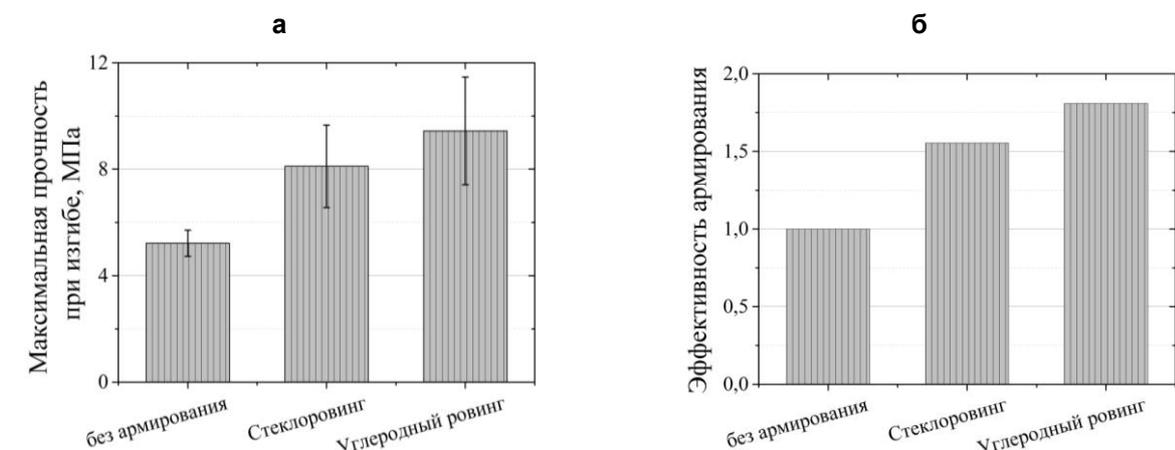
Рисунок 3. Диаграммы изгиба исследуемых образцов

Анализируя результаты, можно отметить следующее. Предел прочности при изгибе неармированного бетона составляет 5.2 МПа. Применение армирующего полотна дает определенный прирост в прочности: так, прочность образцов, армированных стекловолокном, составляет 8.1 МПа, а для образцов, армированных углеродными ровингами, достигает 9.5 МПа. Однако, как видно из представленных на рисунке 3 кривых, первый пик на диаграмме изгиба для образца на основе стекловолокна совпадает с прочностью при изгибе бетонного образца. У образца, армированного углеродными ровингами, величина первого пика составляла примерно 0.5 от предела прочности при изгибе. Далее, с ростом прогиба, наблюдается увеличение нагрузки за счет сопротивляющихся ровингов. Данная способность сохранять форму и работоспособность без разрушения при весьма больших деформациях может найти применение в важных областях, связанных, например, с сейсмостойкостью зданий и сооружений.

Эффективность применения армирующего полотна может быть оценена с помощью коэффициента, показывающего отношение предела прочности при изгибе армированного бетона к пределу прочности при изгибе исходного бетона:

$$k_3 = \frac{\sigma_{ap}}{\sigma_{и}}. \quad (2)$$

Результаты расчета по формуле (2) представлены на рисунке 4б. Как видно из полученных данных, эффективность применения армирующих полотен зависит от типа исходного ровинга. Для образца на основе стекловолокна прочность при изгибе увеличилась в 1.55 раза, а для образца на основе углеродных ровингов – в 1.81 раза. Видно, что имеется определенный эффект от армирования высокопрочными полотнами. Однако по приведенным результатам измерений сложно судить о достоверности полученных результатов, поскольку разброс значений прочности при изгибе у армированных образцов является весьма существенным. Это хорошо видно по стандартному отклонению на гистограммах для образцов армированного бетона.



**Рисунок 4. Предел прочности при изгибе (а) и эффективность армирования (б) для различных образцов**

Для того чтобы оценить достоверность полученных результатов, был проведен статистический анализ достоверности различий результатов испытания по t-критерию Стьюдента. Результаты расчетов представлены в таблице 2. Жирным начертанием выделены различия между результатами испытаний, которые являются значимыми на уровне 0.05. Из полученных результатов следует, что между сериями неармированный бетон и армированный бетон на основе стеклянных или углеродных ровингов существуют значимые различия. Однако при сравнении результатов серий образцов на стеклянных и углеродных ровингах различия не являются достоверными.

**Таблица 2. Статистический анализ достоверности различий между сериями образцов**

Параметр	Армирующий компонент	Неармированный	Стекловолокно	Углеродный ровинг
Предел прочности при изгибе	без армирования		<b>0.0119</b>	<b>0.0051</b>
	стеклянный ровинг			0.3168
	углеродный ровинг			

## Заклучение

Показано, что образцы с текстильным армированием обладают более высокими прочностными свойствами по сравнению с исходными образцами. Эффективность армирования рассчитана с помощью предложенного коэффициента  $k_3$  и приведена в зависимости от типа армирующего полотна. Проанализировано деформационное поведение армированного бетона. Показано, что образцы, армированные высокопрочными текстильными полотнами, обладают большей остаточной несущей способностью, позволяющей сохранять целостность конструкции без разрушений после предельных механических воздействий. Проведен статистический анализ полученных результатов. Выявлена достоверная значимость различий между результатами серий исходных образцов бетона и армированных полотнами образцов. Сравнения значений предела прочности при изгибе между армированными образцами не показали достоверных различий. Однако в целом можно отметить очевидные преимущества использования текстильного армирования, состоящие главным образом в высокой остаточной несущей способности такого материала.

Исследуемая технология армирования может быть использована при создании различных перегородок из бетона, имеющих малую толщину и высокие прочностные характеристики. Кроме того, возможно создание самонесущих конструкций, которые будут более стойкими к коррозионному воздействию и будут обладать меньшим удельным весом, нежели классические железобетонные конструкции.

### Литература

1. Столяров О.Н., Горшков А.С. Применение высокопрочных текстильных материалов в строительстве // Инженерно-строительный журнал. 2009. №4. С. 21–25.
2. Stolyarov O.N., Quadflieg T., Gries T. Effects of fabric structures on the tensile properties of warp-knitted fabrics used as concrete reinforcements // Textile Research Journal. 2015. №85(18). Pp. 1934–1945.
3. Löfgren I. Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction. Department of Civil and Environmental Engineering, Structural engineering. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden. 2005. 276 p.
4. Hegger J., Voss S. Design methods for textile reinforced concrete under bending and shear loading // Proceedings of the 2nd International FIB Congress. Neapol, 5–8 June 2006. Pp. 1–12.
5. Voss S., Hegger J. Dimensioning of textile reinforced concrete structures // 1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC). 2006. Pp. 1–10.
6. Voss S. Design methods for textile reinforced concrete // 6th International PhD Symposium in Civil Engineering. 2006. Pp. 1–8.
7. Peled A., Cohen Z., Pasder Y., Roye A., Gries T. Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites // Cement & Concrete Composites. 2008. №30. Pp. 174–183.
8. Horstmann M., Shams A., Hegger J. Tragverhalten von Sandwichkonstruktionen aus textildbewehrtem Beton. // 6 Kolloquium zu textildbewehrten Tragwerken (CTRS6). Gemeinsames Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 (Dresden) und 532 (Aachen). Berlin, 19.09.2011–20.09.2011. Pp. 329–340.
9. Kulas C., Hegger J., Raupach M., Antons U. Brandverhalten textildbewehrter Bauteile. // 6 Kolloquium zu textildbewehrten Tragwerken (CTRS6). Gemeinsames Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 (Dresden) und 532 (Aachen). Berlin, 19.09.2011–20.09.2011. Pp. 329–340.
10. Курлапов Д.В., Куваев А.С., Родионов А.В., Валеев Р.М. Усиление железобетонных конструкций с применением полимерных композитов // Инженерно-строительный журнал. 2009. №3. С. 17–21.
11. Keil A., Raupach M. Improvement of the Load-Bearing Capacity of Textile Reinforced Concrete by the Use of Polymers // Professor Yoshihiko Ohama Symposium. 12th Volkova A.A., Paykov A.V., Stolyarov O.N., Semenov

### References

1. Stolyarov O.N., Gorshkov A.S. Primeniye vysokoprochnykh tekstilnykh materialov v stroitelstve [Application of Extra-strong Textile Materials in construction]. Magazine of Civil Engineering. 2009. No. 4. Pp. 21–25. (rus)
2. Stolyarov O.N., Quadflieg T., Gries T. Effects of fabric structures on the tensile properties of warp-knitted fabrics used as concrete reinforcements. Textile Research Journal. 2015. No. 85(18). Pp. 1934–1945.
3. Löfgren I. Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction. Department of Civil and Environmental Engineering, Structural Engineering. Chalmers University Of Technology. Göteborg. Sweden. 2005.
4. Hegger J., Voss S. Design methods for textile reinforced concrete under bending and shear loading. Proceedings of the 2nd International FIB Congress. Neapol, 5–8 June 2006. Pp. 1–12.
5. Voss S., Hegger J. Dimensioning of textile reinforced concrete structures. 1st International Conference Textile Reinforced Concrete (ICTRC). 2006. Pp.1–10.
6. Voss S. Design methods for textile reinforced concrete. 6th International PhD Symposium in Civil Engineering. 2006. Pp. 1–8.
7. Peled A., Cohen Z., Pasder Y., Roye A., Gries T. Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites. Cement & Concrete Composites. 2008. No. 30. Pp. 174–183.
8. Horstmann M., Shams A., Hegger J. Tragverhalten von Sandwichkonstruktionen aus textildbewehrtem Beton. 6 Kolloquium zu textildbewehrten Tragwerken (CTRS6). Gemeinsames Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 (Dresden) und 532 (Aachen). Berlin, 19.09.2011–20.09.2011. Pp. 329–340.
9. Kulas C., Hegger J., Raupach M., Antons U. Brandverhalten textildbewehrter Bauteile. 6 Kolloquium zu textildbewehrten Tragwerken (CTRS6). Gemeinsames Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereiche 528 (Dresden) und 532 (Aachen). Berlin, 19.09.2011–20.09.2011. Pp. 329–340.
10. Kurlapov D.V., Kuvayev A.S., Rodionov A.V., Valeyev R.M. Usileniye zhelezobetonnykh konstruktсий s primeneniym polimernykh kompozitov [Reinforcement of concrete structures using polymer composites]. Magazine of Civil Engineering. 2009. No. 3. Pp. 17–21. (rus)
11. Keil A., Raupach M. Improvement of the Load-Bearing Capacity of Textile Reinforced Concrete by the Use of Polymers. S.G., Melnikov B.E. Structure and properties of textile reinforced concrete

- International Congress on Polymers in Concrete. 2007. Pp. 873–881.
12. Параничева Н.В., Назмеева Т.В. Усиление строительных конструкций с помощью углеродных композиционных материалов // Инженерно-строительный журнал. 2010. №2. С. 19–22.
  13. Ghaib M. Al A., Go'rski J. Mechanical properties of concrete cast in fabric formworks // *Cement and Concrete Research*. 2001. № 31. Pp. 1459–1465.
  14. Sivakumar A., Santhanam M. Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres // *Cement & Concrete Composites*. 2007. №29. Pp. 603–608.
  15. Holler S., Butenweg C., Noh S.-Y., Meskouris K. Computational model of textile-reinforced concrete structures // *Computers and Structures*. 2004. №82. Pp. 1971–1979.
  16. Orłowsky J. Modeling the long-term behavior of textile reinforced concrete // *Proceedings of the 5th International PhD Symposium in Civil Engineering*. Delft, the Netherlands. 16–19 June 2004. Pp. 155–163.
  17. Orłowsky J., Antons U., Raupach M. Behaviour of Glass-Filament-Yarns in Concrete as a Function of Time and Environmental Conditions // *Brittle Matrix Compositions 7*. Elsevier Ltd. 2003. Pp. 233–241.
  18. Orłowsky J., Raupach M. Modelling the loss in strength of AR-glass fibres in textile-reinforced concrete // *Materials and Structures*. 2006. №39. Pp. 635–643.
  19. Овчинников И.Г., Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Зиновьев В.С., Умиров А.Д. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 1. Экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций // *Науковедение*. 2012. №4. Статья 7ТВН412.
  20. Reinhardt H.W., Kruger M., Grosse C.U. Concrete Prestressed with Textile Fabric // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003. Vol. 1. №2. Pp. 231–239.
  21. Peled A. Pre-tensioning of fabrics in cement-based composites // *Cement and Concrete Research*. 2007. №37. Pp. 805–813.
  - Capacity of Textile Reinforced Concrete by the Use of Polymers. *Professor Yoshihiko Ohama Symposium. 12th International Congress on Polymers in Concrete*. 2007. Pp. 873–881.
  12. Paranicheva N.V., Nazmeyeva T.V. Usileniye stroitelnykh konstruksiy s pomoshchyu uglerodnykh kompozitsionnykh materialov [Strengthening of building structures using carbon composite materials]. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 2(12). Pp. 19–22 (rus)
  13. Ghaib M. Al A., Go'rski J. Mechanical properties of concrete cast in fabric formworks. *Cement and Concrete Research*. 2001. No. 31. Pp. 1459–1465.
  14. Sivakumar A., Santhanam M. Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres. *Cement and Concrete Composites*. 2007. No. 29. Pp. 603–608.
  15. Holler S., Butenweg C., Noh S.-Y., Meskouris K. Computational model of textile-reinforced concrete structures. *Computers and Structures*. 2004. No. 82. Pp. 1971–1979.
  16. Orłowsky J. Modeling the long-term behavior of textile reinforced concrete. *Proceedings of the 5th International PhD Symposium in Civil Engineering*. Delft, the Netherlands. 16–19 June 2004. Pp. 155–163.
  17. Orłowsky J., Antons U., Raupach M. Behaviour of Glass-Filament-Yarns in Concrete as a Function of Time and Environmental Conditions. In: *Brittle Matrix Compositions 7*. Elsevier Ltd. 2003. Pp. 233–241.
  18. Orłowsky J., Raupach M. Modelling the loss in strength of AR-glass fibres in textile-reinforced concrete. *Materials and Structures*. 2006. No. 39. Pp. 635–643.
  19. Ovchinnikov I.G., Valiyev Sh.N., Ovchinnikov I.I., Zinovyev V.S., Umirov A.D. Voprosy usileniya zhelezobetonnykh konstruksiy kompozitami: 1. Eksperimentalnyye issledovaniya osobennostey usileniya kompozitami izgibayemykh zhelezobetonnykh konstruksiy [Problems of reinforcement of concrete structures with composites: 1. Experimental investigations of peculiarity of reinforcement with composites for bendable concrete structures]. *Naukovedenie*. 2012. No. 4. Article 7EBT412. (rus)
  20. Reinhardt H.W., Kruger M., Grosse C.U. Concrete Prestressed with Textile Fabric. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003. Vol. 1. No. 2. Pp. 231–239.
  21. Peled A. Pre-tensioning of fabrics in cement-based composites. *Cement and Concrete Research*. 2007. No. 37. Pp. 805–813.

**Анна Андреевна Волкова,**  
+7(950)0219390; эл. почта: volkova-anna-andreevna@mail.ru

**Алексей Витальевич Пайков,**  
+7(911)7447543; эл. почта: paykov-alexey@yandex.ru

**Олег Николаевич Столяров,**  
+7(812)5526303; эл. почта: oleg.stolyarov@rambler.ru

**Сергей Георгиевич Семенов,**  
+7(921)9834456; эл. почта: ssgrus@gmail.com

**Борис Евгеньевич Мельников,**  
+7(812)5526303; эл. почта: kafedra@ksm.spbstu.ru

**Anna A. Volkova,**  
+7(950)0219390; volkova-anna-andreevna@mail.ru

**Alexey V. Paykov,**  
+7(911)7447543; paykov-alexey@yandex.ru

**Oleg N. Stolyarov,**  
+7(812)5526303; oleg.stolyarov@rambler.ru

**Sergey G. Semenov,**  
+7(921)9834456; ssgrus@gmail.com

**Boris E. Melnikov,**  
+7(812)5526303; kafedra@ksm.spbstu.ru

doi: 10.5862/MCE.59.6

## Стабилизация торцевой паркетной шашки с использованием эпоксидной смолы

### Stabilizing parquet blocks with epoxy resin

**Д-р техн. наук, профессор С.С. Глазков,**  
*Воронежский государственный архитектурно-  
строительный университет, г. Воронеж,  
Россия*

**S.S. Glazkov,**  
*Voronezh State University of Architecture and Civil  
Engineering, Voronezh, Russia*

**Ключевые слова:** древесина; кислотно-  
основная теория; олигомер; модификация;  
эпоксидная смола

**Key words:** wood materials; acid-base theory;  
oligomer; modification; epoxy resin

**Аннотация.** Торцовый паркет и панели относятся к перспективной группе отделочных материалов из стабилизированной древесины, однако их широкому применению препятствует низкая формоустойчивость в условиях переменного-влажностных сред эксплуатации. Существующие решения по стабилизации торцевой шашки имеют ряд недостатков, в том числе, использование дефицитных или токсичных стабилизаторов. Поэтому в настоящей работе исследованы модифицирующие составы на основе эпоксидной смолы, которая обладает достаточной функциональностью для эффективного структурирования. Проанализированы капиллярно-пористые структуры различных пород древесины и выявлены закономерности, связанные со снижением пористости или удельного объема пустот в ряду сосна – береза – дуб. Установлены основные характеристики пропитывающих составов, которые свидетельствуют о высокой проникающей и структурирующей возможности эпоксидной смолы. Показано, что наряду с повышением прочностных показателей наблюдается последовательное снижение водопоглощения и разбухания с ростом содержания смолы в древесине. Методом тестовых жидкостей установлено, что отверждение эпоксидной смолы в присутствии гексаметилендиамина сопровождается уменьшением доли полярной компоненты в общей величине поверхностного натяжения. Выявлено проникновение молекул олигомера на уровень клетки древесины сосны, обеспечивающее высокий влагозащитный эффект. Полученные результаты свидетельствуют о перспективе использования эпоксидной смолы для модификации торцевого паркета и панелей, эксплуатация которых связана с переменной влажностью и высокими ударными нагрузками.

**Abstract.** While parquet blocks and panels from stabilized wood show much promise as finishing materials, their widespread use is limited by their low dimensional stability in variable-humidity environments. Existing solutions to stabilize the blocks have several disadvantages, including hard-to-find or toxic stabilizers. This is why this study discusses modifications of epoxy resin which has sufficient functionality for effective structuring. We analyzed the capillary-porous structure of different types of wood, and established the patterns associated with a reduction in the porosity or the specific volume of voids in pine, birch and oak. The basic characteristics of impregnating compositions indicating the high penetrative and structuring capabilities of epoxy resin have been discovered. It is shown that in addition to increasing the strength characteristics, there is a steady decline in water absorption and swelling with an increase in resin content in the wood. It has been found by the method of test fluids that curing the epoxy resin in the presence of hexamethylenediamine is accompanied by a decrease in the proportion of polar components in the total value of the surface tension. Oligomer molecules were shown to penetrate pine wood cells, providing a high moisture protection effect. The results suggest it is possible to use epoxy resin to modify parquet blocks and panels that would be used under variable humidity and high impact loads.

Ассортимент материалов для покрытий полов промышленных и гражданских помещений в настоящее время представлен широким разнообразием композиционных материалов [1–4], которые можно условно разделить на три большие группы. Первая, элитная, группа представлена напольными покрытиями из цельной древесины, где преобладают шпунтованная доска в основном хвойных пород, а также многочисленные виды продольного паркета, в основном из ценных твердых лиственных пород – дуб, бук, ясень и др. [5].

Glazkov S.S. Stabilizing parquet blocks with epoxy resin

Ко второй, наиболее представительной, группе относятся полимерные синтетические покрытия рулонного характера – многочисленные виды линолеума [6, 7], в основе которых лежит поливинилхлоридный полимер. Этот материал получил достаточно широкое применение для изготовления элементов отделки [8] как для внутреннего, так и для внешнего использования: различные сайдинговые покрытия, оконные конструкции и др. И, наконец, третья группа напольных покрытий – это, как правило, древеснополимерные композиционные материалы, к которым принадлежат спрессованные с использованием термореактивных смол продукты переработки древесины. В данном случае имеются в виду получившие в настоящее время признание и определенный сегмент на строительном рынке декорированные под ценные породы древесины различные типы ламината на основе МДФ – древесноволокнистой плиты средней плотности [9]. К этой перспективной группе можно отнести и торцовый паркет, использование которого требует применения разнообразных полимерных стабилизаторов формоустойчивости торцевой шашки в силу специфики торцевой поверхности, крайне восприимчивой к переменновлажностным условиям эксплуатации [2, 10]. Торцевой паркет изготавливают из различных пород древесины как хвойных, так и лиственных, в том числе ценных твердых пород.

Существует информация [2] о применении малоценной древесины быстрорастущей лиственной породы для получения торцевого паркета. Речь идет о березе, имеющей существенный сегмент в породном составе лесистой части Центрального и Центрально-Черноземного района России. Наряду с быстрорастущей березой авторы предлагают использовать тонкомерную древесину, образующуюся в качестве отходов в период рубок, ухода, а также на различных этапах переработки целевой древесины [2].

Использование малоценной березы, тонкомера и вторичного древесного сырья предъявляет повышенные требования к модификаторам-стабилизаторам древесины, позволяющих поднять уровень эксплуатационных показателей торцевого паркета из модифицированной древесины до конкурентного уровня на рынке паркета из целевой древесины, в том числе ценных пород [11].

Известно применение различных поливиниловых олигомеров на основе пипирилена, 4-винилциклогексен-1 и др. для стабилизации формоустойчивости шашки торцевого паркета [12, 13]. Достоинством данных соединений является способность проникать на клеточный уровень древесной заготовки, плотно закупоривая микрокапилляры. Однако низкая функциональность не обеспечивает необходимый уровень структуризации, в том числе с компонентами древесного вещества, который бы дал комплексный эффект повышения физико-механических свойств в сочетании с высоким показателем водостойкости [14, 15].

Добиваются высокой гидрофобизации древесины посредством обработки силоксановыми и капролактамовыми полимерами [16, 17], формированием поверхностных пленок из комплексов функциональных полимеров [18], а также химической модификацией, в частности акриловой кислотой [19, 20]. Однако необходимо отметить, что предлагаемые методы сопряжены с применением дефицитных, дорогостоящих и химически высокоагрессивных модификаторов, требующим высокотехнологичного оборудования, что существенно повышает стоимость конечного продукта.

Эпоксидные смолы (ЭС) нашли широкое применение в различных отраслях промышленности в качестве клеев, мастик, компаундов, наливных половых покрытий с беспылевым эффектом и др. [21]. В последнее время формируется область их использования, связанная с высокими проникающими возможностями олигомеров ЭС в пористые материалы с последующим структурированием под влиянием различных отвердителей и приданием конечному композиту уникальных эксплуатационных свойств [22–25].

В настоящей работе предпринята попытка исследования возможностей ЭС марки ЭД-20 для модификации торцевых шашечных элементов из древесины с целью придания конечному изделию повышенной формоустойчивости в средах с переменной влажностью. Формостабильность в случае древесины требует плотной упаковки олигомерных макромолекул в капиллярах клетки, ответственной за изменение размеров древесного образца в целом. На стадиях адсорбции и десорбции молекулы воды проникают на клеточный уровень, в основном через торцевую поверхность, по многочисленным водопроводящим капиллярам различного рода и благодаря высокой гидрофильности целлюлозной составляющей насыщают капилляры клеточной стенки, приводя к увеличению ее размеров [26]. Поэтому только плотная упаковка олигомера даже на клеточном уровне не способна придать древесному изделию достаточную формоустойчивость. Только олигомеры, содержащие реакционноспособные функциональные группы, которые допускают при определенных условиях реакции превращения, в том числе с функциональными группами древесинного вещества, обеспечивают образование единого структурированного,

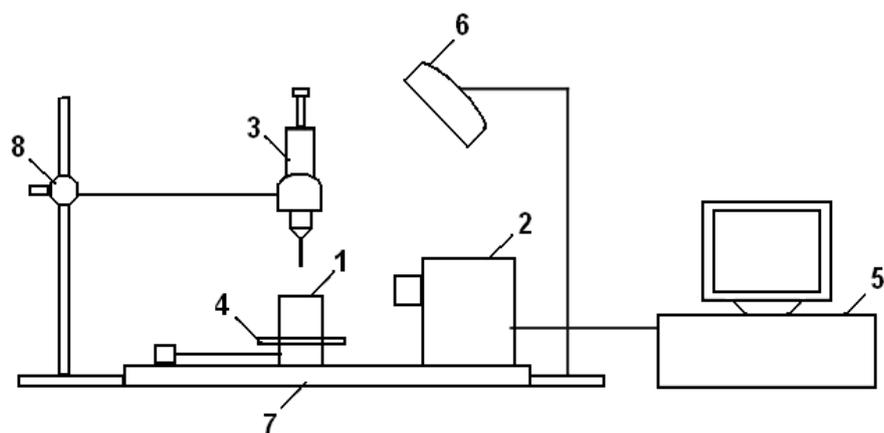
сшитого комплекса олигомера и древесины на основе прочных ковалентных связей и повышение гидрофобных свойств получаемого древеснополимерного композита.

### Экспериментальная часть

Эпоксидная смола (ЭС) марки ЭД–20 представляет собой вязкую жидкость светло-желтого цвета. В качестве отвердителя использовался гексаметилендиамин, представляющий собой низковязкую жидкость темно-коричневого цвета [27, 28].

Для снижения вязкости, поверхностного натяжения и повышения подвижности макромолекул олигомера смолу разбавляли ацетоном [29, 30].

Отвердитель вводился в количестве 10 об. частей на 100 об. части смолы [31]. Плотность растворов измерялась с помощью пикнометров, условная вязкость приготовленных пропиточных растворов – по вискозиметру ВЗ-246 со сменой насадок с соответствующим диаметром сопла (2, 4, 6 мм). Поверхностное натяжение определялось методом Де-Нуи, то есть тензиметрическим измерением усилия отрыва платинового кольца от поверхности жидкости. Краевой угол смачивания различных твердых поверхностей оценивался методом «сидячей» капли с помощью компьютерной обработки видеоизображения согласно приведенной ниже схеме установки (рис. 1) [32].



**Рисунок 1. Установка для определения краевого угла смачивания: 1 – исследуемый образец; 2 – цифровая видеокамера; 3 – шприц-дозатор; 4 – подвижная платформа; 5 – компьютер; 6 – светильник; 7 – стационарная платформа; 8 – лабораторный штатив**

Величины краевого угла смачивания (КУС) вычислялись с использованием программы обработки видеоизображения капли, учитывающей ее ширину и высоту и моделирующей в динамическом режиме соответствующие окружности и касательные в точке раздела трех фаз. По итогам обработки видеofайла был создан отчетный файл в формате Excel, в котором приведены величины КУС во времени с разностью в одну секунду [32].

Для модификации использовались образцы древесины сосны размерами 20 x 20 x 30 мм, которые предварительно выдерживались в термошкафу до постоянной массы и хранились в эксикаторе над хлористым кальцием.

Пропитка образцов древесины осуществлялась методом полного погружения в растворы ЭС с определенной концентрацией при комнатной температуре в течение заданного времени. Затем образцы сушили в вытяжном шкафу для удаления основной части растворителя и в завершение нагревали в термошкафу при  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 5...7 минут. Время определялось по изменению массы образца.

Образцы древесины с определенным содержанием ЭС подвергались испытаниям на показатели водостойкости и прочности согласно [26, 27].

Расчет компонентов свободной поверхностной энергии твердых тел производился в соответствии с методом VOG [33, 34] с использованием тестовых жидкостей, свойства которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Компоненты поверхностной энергии тестовых жидкостей [34]

Жидкости	$\sigma$ , мДж/м <sup>2</sup>	$\sigma^{LW}$ , мДж/м <sup>2</sup>	$\sigma^{AB}$ , мДж/м <sup>2</sup>	$\sigma^+$ , мДж/м <sup>2</sup>	$\sigma^-$ , мДж/м <sup>2</sup>	$\sigma^{AB}/\sigma$ , %
Вода	72,80	21,80	51,00	25,50	25,50	70,06
Дийодметан	50,80	50,80	0,00	0,00	0,00	0,00
Формаимид	58,00	39,00	19,00	2,28	39,60	32,76

### Обсуждение результатов исследования

На начальном этапе были исследованы некоторые свойства пропитывающих растворов с позиций проникающей способности в капиллярно-пористую матрицу древесины сосны, свойства которой в сравнении с древесиной березы и дуба приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики исходных пород древесины [26]

Порода	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Пористость, %	Прочность на сжатие вдоль волокон, МПа	Удельный объем пустот, мл/г	$W_{max}^*$ , %	Кoeff. разбухания, % на % влажности**			Твердость торцевая, Н/мм <sup>2</sup>
						рад.	танг.	объем.	
Сосна	505	66,4	47	1,31	185	0,18	0,31	0,51	28,4
Береза	640	58,0	50	0,91	135	0,29	0,34	0,65	46,3
Дуб	690	54,9	53	0,80	116	0,20	0,30	0,52	65,5

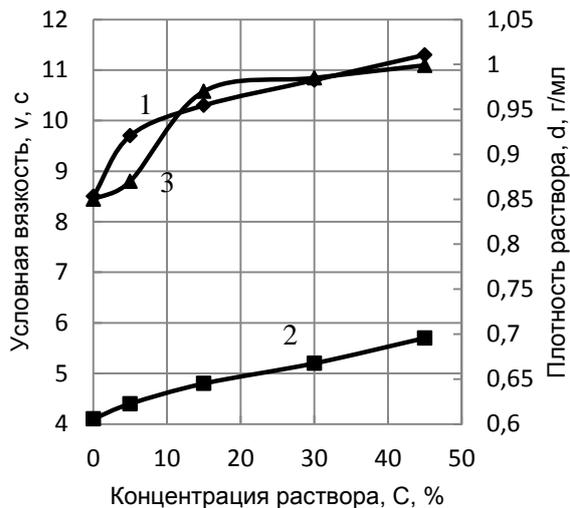
\* $W_{max}$  – максимальная влажность древесины

\*\*при влажности древесины 12 %; от радиального к тангенциальному направлению

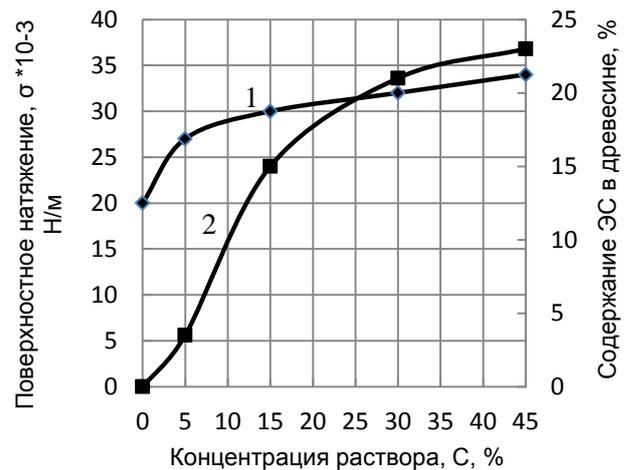
Для приведенных пород можно отметить последовательное увеличение плотности, прочности на сжатие вдоль волокон, торцевой твердости, а также снижение пористости и удельного объема пустот в ряду сосна – береза – дуб. Данная закономерность позволяет предполагать, что анизотропность будет коррелировать в указанном ряду. Однако существенное влияние на морфологию оказывает химический состав (терпеновые смолы и дубильные вещества для сосны и дуба соответственно). Из таблицы 2 видно, что береза, лишенная отмеченных компонентов, обладает самым высоким коэффициентом разбухания во всех направлениях. Между тем, сосна обладает самой высокой пористостью, в том числе миофибриллярными пустотами клеточной стенки с размерами 5...10 мм, что предъявляет повышенные требования к проницаемости составов.

Установлено (рис. 2), что по мере разбавления ЭС ацетоном происходит последовательное снижение вязкости раствора, и уже при 45 %-м содержании ЭС условная вязкость по ВЗ-246 сравнима с вязкостью воды, для которой вязкость по ВЗ-4 и ВЗ-2 составляет 5 и 10 секунд соответственно. Плотность раствора в области низких концентраций ЭС ниже плотности растворителя, а после 5 % наблюдается последовательный рост. Данная закономерность характерна для растворов полимеров, особенно полярных, где проявляется высокое межмолекулярное взаимодействие, способствующее увеличению плотности упаковки между макромолекулами полимеров и олигомеров.

В интервале до 45 % ЭС отмечено повышение поверхностного натяжения (рис. 3, кривая 1), которое, тем не менее, остается меньше, чем для воды, более чем в 2 раза (вода –  $72 \cdot 10^{-3}$  Н/м). Данные физические свойства пропитывающих растворов обеспечивают хорошее проникновение ЭС в пористую структуру древесины, которое подтверждается характером кривой 2 на графике рисунка 3. Содержание ЭС в древесине растет с 0 до 22 % в диапазоне концентрации раствора 5...45 % об. соответственно.



**Рисунок 2. Зависимость условной вязкости от концентрации раствора:**  
 1 – вязкость по ВЗ-2; 2 – по ВЗ-4;  
 3 – зависимость плотности раствора от концентрации раствора



**Рисунок 3. Зависимость поверхностного натяжения ( $\sigma$ ) – 1 и содержания ЭС в древесине – 2 от концентрации пропитывающего раствора (С)**

Для количественной оценки способности ЭС в процессе отверждения изменять гидрофильно-гидрофобные свойства использован метод Van-Oss-Good (VOG) – метод тестовых жидкостей [34]. Исследованные растворы ЭС наносились на стекло с отвердителем и без него. После удаления растворителя и отверждения смолы ее поверхность исследовалась тестовыми жидкостями (табл. 1) для определения КУС и расчета компонентов свободной поверхностной энергии (СПЭ): неполярной – Лившица – Ван-дер-Ваальсовой ( $\sigma^{LW}$ ) – и двух полярных – кислотной ( $\sigma^+$ ) и основной ( $\sigma^-$ ), связанных между собой следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma^{LW} + \sigma^{AB} \\ \sigma^{AB} &= 2\sqrt{\sigma^+ \sigma^-} \\ \sigma &= \sigma^{LW} + 2\sqrt{\sigma^+ \sigma^-}\end{aligned}\quad (1)$$

Полученные величины КУС использовались при решении системы уравнений (2), и с помощью программы MathCad рассчитывались компоненты СПЭ, значения которых приведены в таблице 3.

$$\begin{aligned}\sigma_s^{LW} &= \frac{1}{4} \sigma_{пробная} (1 + \cos \theta_{пробная})^2 \\ \sigma_{l1} \cdot (1 + \cos \theta_1) &= (\sigma_s^{LW} \sigma_{l1}^{LW})^{1/2} + 2(\sigma_s^+ \sigma_{l1}^-)^{1/2} + 2(\sigma_s^- \sigma_{l1}^+)^{1/2} \\ \sigma_{l2} \cdot (1 + \cos \theta_2) &= (\sigma_s^{LW} \sigma_{l2}^{LW})^{1/2} + 2(\sigma_s^+ \sigma_{l2}^-)^{1/2} + 2(\sigma_s^- \sigma_{l2}^+)^{1/2}\end{aligned}\quad (2)$$

Как видно из таблицы 3, отверждение смолы с ростом ее содержания приводит к существенному снижению полярной составляющей  $\sigma^{AB}$  вплоть до нулевого значения за счет кислотной составляющей  $\sigma^+$ . При этом как в исходной, так и в отвержденной смоле отмечено снижение кислотной и рост основной компоненты СПЭ. Исходя из химической природы компонента смолы, можно предположить, что носителем кислотных свойств поверхности является бисфенол, или дифенилолпропан, который в исходной смоле содержится в остаточных количествах. Если для смолы без отвердителя и, соответственно, без стадии отверждения кислотная компонента определяется при низком содержании смолы (тонкая пленка) в основном энергетикой подложки, – стекла – то при отверждении происходит, вероятно, связывание остаточного дифенилолпропана, что с ростом толщины пленки сопровождается полным исчерпанием кислотной и существенным увеличением основной компоненты (табл. 3). Наличие устойчивого роста основной компоненты для отверждаемой смолы можно связать с присутствием отвердителя (гексаметилендиамина),

содержащего аминные функциональные группы, обладающие основными свойствами. С увеличением концентрации смолы наблюдается увеличение доли неполярной – гидрофобной (Лившица – Ван-дер-Ваальсовой) – составляющей в энергетическом балансе поверхности. Отмеченная закономерность, связанная с гидрофобизацией отвержденной смолы и ее возможным взаимодействием с древесинным веществом, способна проявиться в достижении высоких показателей водостойкости модифицированных образцов.

Таблица 3. Составляющие СПЭ исходной и отвержденной ЭС

№ п/п	Подложка	КУС, °θ			СПЭ, мДж/м						
		ДМ	H <sub>2</sub> O	ФА	$\sigma^{LW}$	$\sigma^+$	$\sigma^-$	$\sigma^{AB}$	$\sigma$	$\sigma^{AB}/\sigma$ ; %	Примечания
К	Стекло	52	38	38	33.2	0.87	44.0	12.4	45.5	27.2	
1	5 %	56	52	47	30.9	0.78	31.6	10.0	40.9	24.4	Без отверд.
2	15 %	28	47	38	45.0	0.04	32.6	2.4	47.4	5.0	Без отверд.
3	45 %	32	47	38	43.4	0.11	32.5	3.8	47.2	8.1	Без отверд.
4	5 %	21	74	47	47.5	0.09	6.3	1.6	49.0	3.2	С отверд.
5	15 %	21	56	44	47.5	0	24.8	0	47.5	0	С отверд.
6	45 %	19	56	46	48.0	0	26.3	0	48.0	0	С отверд.

Это подтверждено результатами физико-механических испытаний модифицированных образцов древесины. Так, на рисунке 4 показано снижение показателей водопоглощения (кривая 1) и разбухания (кривая 2), в исследованном диапазоне концентраций 87...55 % и 72...33 % соответственно. Это позволяет говорить о повышении водостойкости и, соответственно, формостабильности модифицированных образцов более чем в два раза.

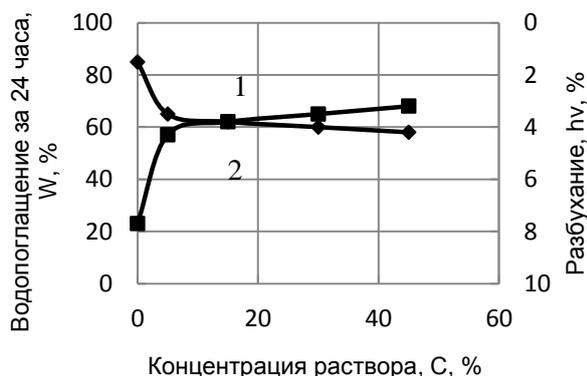


Рисунок 4. Зависимость водопоглощения за 24 часа ( $W_{24}$ ) – 1 и разбухания за 24 часа ( $h_v$ ) – 2 от концентрации раствора (C)

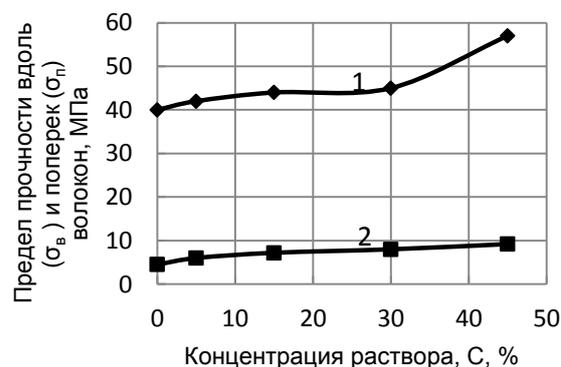
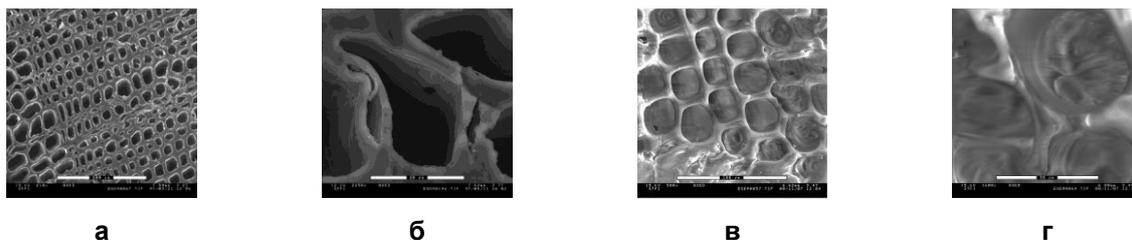


Рисунок 5. Зависимость предела прочности древесины вдоль волокон ( $\sigma_v$ ) – 1 и поперек волокон ( $\sigma_n$ ) – 2 от концентрации раствора (C)

Величины прочностных показателей, представленных на рисунке 5, изменяются в более широком интервале: от 5 до 15 % для показателя предела прочности вдоль волокон, и от 20 до 90 % – поперек волокон. В данном случае также наблюдается устойчивая тенденция к существенному улучшению физико-механических показателей.

При этом характер кривых в обоих случаях позволяет говорить о возможных потенциальных резервах ЭС, которые проявляются в некотором росте всех показателей симбатно с содержанием смолы в древесине в исследованном интервале концентраций. Однако увеличивать дальнейшее содержание ЭС нецелесообразно по экономическим причинам.

Расположение ЭС на уровне клетки представлено на рисунке 6. Снимок лазерного среза выполнен с помощью электронного микроскопа ESEM (USA).



**Рисунок 6. Электронные снимки расположения олигомера на клеточном уровне сосны: а – клетки сосны без олигомера (500×); б – клетки и межклеточный лигноцеллюлозный матрикс (1600×); в – клетки КМС с олигомером; г – олигомер в клетке и межклеточном лигноцеллюложном матриксе**

Как следует из рисунка 6, олигомер диановой смолы с молекулярной массой 1000...2000 способен проникать на клеточный уровень структуры древесины, плотно заполняя полость клетки, что способствует повышению характеристик водостойкости пропитанных образцов за счет уменьшения порового пространства и снижения доступа молекул воды к клеточной стенке.

### Выводы

При исследовании эпоксидной смолы для модификации торцевых паркетных заготовок из сосны достигнуты следующие результаты.

1. Проанализированы капиллярно-пористые структуры различных пород древесины; выявлены закономерности, связанные со снижением пористости, или удельного объема пустот, в ряду сосна – береза – дуб.

2. Установлены основные реологические и проникающие свойства растворов ЭС в ацетоне, которые коррелируют с содержанием смолы в структуре древесины и физико-механическими свойствами композита.

3. Показано, что отверждение ЭС сопровождается гидрофобизацией ее поверхности с преобладанием основной компоненты СПЭ при увеличении концентрации смолы.

4. Выявлено последовательное снижение водопоглощения и разбухания модифицированных образцов сосны с ростом содержания ЭС в составе модифицированной древесины.

5. Полученный модифицирующий эффект от применения эпоксидной смолы позволяет говорить о целесообразности применения диановых смол для производства торцевого паркета и стеновых панелей для эксплуатации в условиях повышенных ударных нагрузок и переменной влажности, например, на участках тяжелого машиностроения, взлетно-посадочных полосах и т. д., где достойного конкурента для торцевой поверхности древесины практически нет.

### Литература

1. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии: учеб. пособие. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
2. Глазков С.С. Древесные композиционные материалы на основе вторичного сырья. Воронеж: Издательство Воронежского государственного университета, 2002. 174 с.
3. Lepadatu A-M, Asaftei S., Vennemann N. Investigation of new composite materials based on activated EPDM rubber waste particles by liquid polymers // *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. №132(25). 42097.
4. Scelsi L., Hodzic A., Soutis C., Hayes S.A., Rajendran S., AlMa'adeed M. A., Kahraman R. A review on composite materials based on recycled thermoplastics and glass fibres // *Plastics Rubber and Composites*. 2011. №3(40). Pp. 1–10.
5. Игнатович Л.В. Конструктивные и технологические особенности напольных покрытий: монография. Минск: БГТУ, 2011. 273 с.
6. Султанова Ш.Д. Стратегия развития нефтехимического кластера: монография. Нижнекамск: Нижнекамский

### References

1. Kerber M.L. *Polimernyye kompozitsionnyye materialy. Struktura. Svoystva. Tekhnologii; ucheb. posobiye [Polymeric composite materials. Structure. Properties. Technologies: tutorial]*. Saint-Petersburg. Professiya. 2008. 560 p. (rus)
2. Glazkov S.S. *Drevesnyye kompozitsionnyye materialy na osnove vtorichnogo syrya [Wood composite recyclable materials]*. Voronezh. Izdatelstvo Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. 2002. 174 p. (rus)
3. Lepadatu A-M, Asaftei S., Vennemann N. Investigation of new composite materials based on activated EPDM rubber waste particles by liquid polymers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. No. 132(25). 42097.
4. Scelsi L., Hodzic A., Soutis C., Hayes S.A., Rajendran S., AlMa'adeed M.A., Kahraman R. A review on composite materials based on recycled thermoplastics and glass fibres. *Plastics Rubber and Composites*. 2011. No. 3(40). Pp. 1–10.
5. Ignatovich L.V. *Konstruktivnyye i tekhnologicheskiye osobennosti napolnykh pokrytiy: monografiya [Structural and technological features of floor covering: monograph]*.

- химико-технологический институт (филиал) КГТУ. 2011. 132 с.
7. Тенденции рынка линолеума [Электронный ресурс]. URL: <http://www.stroyka.ru/Rynok/1479577/tendentsii-rynka-linoleuma/html>. (Дата обращения 18.02.2015)
  8. Симонов Е. В. Стеллим пол сами: ламинат, линолеум, плитка. Санкт-Петербург: Питер, 2009. 192 с.
  9. Pernilla J. Laboratory study to determine the critical moisture level for mould growth on building materials // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2012. №1(73). Pp. 23–32.
  10. Ашкенази Д.М. Анизотропия древесины и древесных материалов: учеб. пособие. М., 1978. 224 с.
  11. Stroytechmarket [Электронный ресурс]. URL: <http://stroytechmarket.ru/kollekcija-torcevogo-parketa.html> (Дата обращения 18.02.2015).
  12. Глазков С.С. Низкомолекулярные сополимеры на основе метакриловых мономеров и кубового остатка // *Бутлеровские сообщения*. 2010. Том 19. №3. С. 71–74.
  13. Глазков С.С. Хемосорбционные процессы при создании целлюлозосодержащих композитов // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2009. №1(9). С. 67–73.
  14. Глазков С.С. Физико-механические и энергетические характеристики модифицированной древесины березы // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2012. №2(14). С. 168–174.
  15. Глазков С.С., Рудаков О.Б. Реакционноспособные олигомеры и полимеры для модификации энергетического состояния поверхности контакта в композиционных материалах // *Бутлеровские сообщения*. 2011. №3(9). С. 71–74.
  16. Park Y., Ahn Y. Facile Fabrication of Polysiloxane Nanorods on Magnesium Surface in the Presence of 1,6-diphosphohexane to Obtain a Superhydrophobic Surface // *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2011. №32(11). Pp. 4063–4066.
  17. Buck M.E., Schwartz S. C., Lynn D. M. Superhydrophobic Thin Films Fabricated by Reactive Layer-by-Layer Assembly of Azlactone-Functionalized Polymers // *Chemistry of Materials*. 2010. №23(22). Pp. 6319–6327.
  18. Ermeydan M.A., Cabane E., Hass P., Koetz J., Burgert I. Fully biodegradable modification of wood for improvement of dimensional stability and water absorption properties by poly(epsilon-caprolactone) grafting into the cell walls // *Green Chemistry*. 2014. №4(16). Pp. 3313–3321.
  19. Kassale A., Barouni K., Bazaoui M., Albourine A. Modification of Wood by Grafting of Carboxylic Acid Functions Using Acrylic Acid // *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences*. 2015. №5(2). Pp. 1700–1710.
  20. Ou R., Wang Q., Wolcott M.P., Sui S., Xie Y., Song Y. Effects of Chemical Modification of Wood Flour on the Rheological Properties of High-Density Polyethylene Blends // *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. №23(131). 41200.
  21. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции: монография. М.: Химия, 1982. 232 с.
  22. Kukowka S., Langer E., Kuczynska H., Kaminska-Bach G. Self-stratifying coatings based on Schiff base epoxy resins // *Journal of Coatings Technology and Research*. 2014. №6(11). Pp. 865–872.
  23. Pan X., Webster D.C. Impact of Structure and Functionality of Core Polyol in Highly Functional Biobased Epoxy Resins // *Macromolecular Rapid Communications*. 2011. №32(17). Pp. 1324–1330.
  24. Sindu B.S., Sasmal S. Evaluation of mechanical characteristics of nano modified epoxy based polymers using molecular dynamics // *Computational Materials Science*. 2015. №1(96). Pp. 146–158.
  25. Jaillet F., Desroches M., Auvergne R., Boutevin B., Minsk. BG TU. 2011. 273 p. (rus)
  6. Sultanova Sh.D. *Strategiya razvitiya neftekhimicheskogo klastera: monografiya [Development strategy of petrochemical cluster: monograph]*. Nizhnekamsk: Nizhnekamskiy khimiko-tehnologicheskii institut (branch) KGTU. 2011. 132 p. (rus)
  7. *Tendentsii rynka linoleum [Linoleum market trends]*. URL: <http://www.stroyka.ru/Rynok/1479577/tendentsii-rynka-linoleuma/html>. (accessed: 18.02.2015) (rus)
  8. Simonov Ye.V. *Stelim pol sami: laminat, linoleum, plitka [Lay floor ourselves: laminate, linoleum, tile]*. Saint-Petersburg: Piter. 2009. 192 p. (rus)
  9. Pernilla J. Laboratory study to determine the critical moisture level for mould growth on building materials. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2012. No. 1(73). Pp. 23–32.
  10. Ashkenazi D.M. *Anizotropiya drevesiny i drevesnykh materialov; ucheb. posobiye [Wood materials anisotropy; tutorial]*. Moscow. 1978. 224 p. (rus)
  11. *Stroytechmarket [Building market]*. URL: <http://stroytechmarket.ru/kollekcija-torcevogo-parketa.html> (accessed: 18.02.2015) (rus)
  12. Glazkov S.S., Zharinov Yu.B., Rudakov O.B. *Nizkomolekulyarnyye sopolimery na osnove metakrilovykh monomerov i kubovogo ostatka [Low-molecular copolymer on basics of methacrylic monomer and cube rest]*. *Butlerovskiyе soobshcheniya*. 2010. No. 3(19). Pp. 71–74. (rus)
  13. Glazkov S.S., Rudakov O.B. *Khemosorbtsionnyye protsessy pri sozdanii tsellyulozosoderzhashchikh kompozitov [Chemisorbed processes under creation cellulose based composites]*. *Sorbtsionnyye i Khromatograficheskie Protssesy*. 2009. No. 1(9). Pp. 67–73. (rus)
  14. Glazkov S.S., Snycheva Ye.V., Albinskaya Yu.S., Rudakov O.B. *Fiziko-mekhanicheskiye i energeticheskiye kharakteristiki modifitsirovannoy drevesiny breezy [Physico-mathematical and energy characteristics of modified birch wood]*. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy*. 2012. No. 2(14). Pp. 168–174. (rus)
  15. Glazkov S.S., Rudakov O.B. *Reaktionnosposobnyye oligomery i polimery dlya modifikatsii energeticheskogo sostoyaniya poverkhnosti kontakta v kompozitsionnykh materialakh [Reactive oligomers and polymers for energy state modify of contact area in composite material]*. *Butlerovskiyе soobshcheniya*. 2011. No. 3(19). Pp. 71–74. (rus)
  16. Park Y., Ahn Y. Facile Fabrication of Polysiloxane Nanorods on Magnesium Surface in the Presence of 1,6-diphosphohexane to Obtain a Superhydrophobic Surface. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2011. No. 32(11). Pp. 4063–4066.
  17. Buck M.E., Schwartz S. C., Lynn D. M. Superhydrophobic Thin Films Fabricated by Reactive Layer-by-Layer Assembly of Azlactone-Functionalized Polymers. *Chemistry of Materials*. 2010. No. 23(22). Pp. 6319–6327.
  18. Ermeydan M.A., Cabane E., Hass P., Koetz J., Burgert I. Fully biodegradable modification of wood for improvement of dimensional stability and water absorption properties by poly(epsilon-caprolactone) grafting into the cell walls. *Green Chemistry*. 2014. No. 4(16). Pp. 3313–3321.
  19. Kassale A., K. Barouni K., Bazaoui M., Albourine A. Modification of Wood by Grafting of Carboxylic Acid Functions Using Acrylic Acid. *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences*. 2015. No. 5(2). Pp. 1700–1710.
  20. Ou R., Wang Q., Wolcott M. P., Sui S., Xie Y., Song Y. Effects of Chemical Modification of Wood Flour on the Rheological Properties of High-Density Polyethylene Blends. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. No. 131. 41200.
  21. Chernin I.З., Smekhov F.М., Zherdev Yu.V. *Epoksidnyye*
- Глазков С.С. Стабилизация торцевой паркетной шашки с использованием эпоксидной смолы

- Caillol S. New biobased carboxylic acid hardeners for epoxy resins // *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2013. №115(6). Pp. 698–708.
26. Дреvesиноведение и лесное товароведение: учеб. пособие. М.: МГУЛ, 2007. 351 с.
27. Кочнова З.А., Жаровнюк Е.С., Чалых А.Е. Эпоксидные смолы и отвердители: промышленные продукты. М.: ООО «Пэйнт-Медиа», 2006. 360 с.
28. Toldy A., Szolnoki B., Csontos I., Marosi G. Green Synthesis and Characterization of Phosphorus Flame Retardant Crosslinking Agents for Epoxy Resins // *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. №131(7). 40105.
29. Wan J., Bu Z-Y, Xu C-J, Li B-G, Fan H. Learning about novel amine-adduct curing agents for epoxy resins: Butylglycidylether-modified poly(propyleneimine) dendrimers // *Thermochimica Acta*. 2011. №1(2). Pp. 72–82.
30. Ashori A., Behzad H. M., Tarmian A. Effects of chemical preservative treatments on durability of wood flour/HDPE composites // *Composites Part B Engineering*. 2013. №47(4). Pp. 308–313.
31. Глазков С.С. Влияние анизотропии материала на краевой угол смачивания и энергетические характеристики поверхности древесины // Конденсированные среды и межфазные границы. 2014. №1(16). С. 11–16.
32. Guettler B.E., Moresoli C, Simon L. C. Contact angle and surface energy analysis of soy materials subjected to potassium permanganate and autoclave treatment // *Industrial Crops and Products*. 2013. №50(10). Pp. 219–226.
33. Good R. J. Contact angle, wetting, and adhesion: a critical review // *Contact Angle, Wettability and Adhesion*. 1993. Pp. 3–36.
- polimery i kompozitsii: monografiya [Epoxy polymers and compositions: monograph]*. Moscow. Khimiya. 1982. 232 p. (rus)
22. Kukowka S., Langer E., Kuczynska H., Kaminska-Bach G. Self-stratifying coatings based on Schiff base epoxy resins. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2014. No. 6(11). Pp. 865–872.
23. Pan X., Webster D.C. Impact of Structure and Functionality of Core Polyol in Highly Functional Biobased Epoxy Resins. *Macromolecular Rapid Communications*. 2011. No. 32(17). Pp. 1324–1330.
24. Sindu B.S., Sasml S. Evaluation of mechanical characteristics of nano modified epoxy based polymers using molecular dynamics. *Computational Materials Science*. 2015. No. 1(96). Pp. 146–158.
25. Jaillat F., Desroches M., Auvergne R., Boutevin B., Caillol S. New biobased carboxylic acid hardeners for epoxy resins. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2013. No. 115(6). Pp. 698–708.
26. *Drevesinovedeniye i lesnoye tovarovedeniye: ucheb. posobiye [Wood science and forest merchandising: tutorial]*. Moscow. MGUL. 2007. 351 p. (rus)
27. Kochnova Z.A., Zharovnyuk Ye.S., Chalykh A.Ye. *Epoksidnyye smoly i otverditeli: promyshlennyye produkty [Epoxy resins and hardeners: industrial products]*. Moscow. Peynt-Media. 2006. 360 p. (rus)
28. Toldy A., Szolnoki B., Csontos I., Marosi G. Green Synthesis and Characterization of Phosphorus Flame Retardant Crosslinking Agents for Epoxy Resins. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. No. 131(7). 40105.
29. Wan J., Bu Z-Y, Xu C-J, Li B-G, Fan H. Learning about novel amine-adduct curing agents for epoxy resins: Butylglycidylether-modified poly(propyleneimine) dendrimers. *Thermochimica Acta*. 2011. No. 1(2). Pp. 72–82.
30. Ashori A., Behzad H.M., Tarmian A. Effects of chemical preservative treatments on durability of wood flour/HDPE composites. *Composites Part B Engineering*. 2013. No. 47(4). Pp. 308–313.
31. Glazkov S.S. Vliyaniye anizotropii materiala na krayevoy ugol smachivaniya i energeticheskiye kharakteristiki poverkhnosti drevesiny [Influence of material anisotropy on wetting contact angle and energy characteristics of surface wood]. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy*. 2014. No. 1(16). Pp. 11–16. (rus)
32. Guettler B.E., Moresoli C, Simon L.C. Contact angle and surface energy analysis of soy materials subjected to potassium permanganate and autoclave treatment. *Industrial Crops and Products*. 2013. No. 50(10). Pp. 219–226.
33. Good R.J. Contact angle, wetting, and adhesion: a critical review. *Contact Angle, Wettability and Adhesion*. 1993. Pp. 3–36.

Сергей Сергеевич Глазков,  
+7(473)2903978; эл. почта: glackov@mail.ru

Sergey S. Glazkov,  
+7(473)2903978; glackov@mail.ru

© Глазков С.С., 2015

doi: 10.5862/MCE.59.7

## Влияние добавок глинитов в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня

### The influence of clay additives in Portland cement on the compressive strength of the cement stone

*Канд. техн. наук, старший преподаватель  
А.Р. Гайфуллин,  
д-р техн. наук, профессор Р.З. Рахимов,  
д-р техн. наук, профессор Н.Р. Рахимова,  
Казанский государственный архитектурно-  
строительный университет, г. Казань,  
Россия*

*A.R. Gaifullin,  
R.Z. Rakhimov,  
N.R. Rakhimova,  
Kazan State University of Architecture and  
Engineering, Kazan, Russia*

**Ключевые слова:** глинит; глина; обжиг; минеральный состав; температура обжига; портландцемент; добавки к бетону; цементный камень; прочность при сжатии

**Key words:** glinite; clay; calcination; mineral composition; calcination temperature; Portland cement; concrete additive; cement stone; compressive strength

**Аннотация.** Введение минеральных добавок в портландцемент является одним из актуальных направлений решения проблем ресурсо- и энергосбережения, а также охраны окружающей среды при производстве и применении строительных материалов. Расширение сырьевой базы минеральных добавок может быть достигнуто за счет использования натуральных пуццоланов и термоактивированных повсеместно распространенных полиминеральных глин. В статье приведены результаты сравнительных исследований влияния добавления в портландцемент полиминеральных глин, обожженных при различных температурах, разной крупности помола, с различным содержанием каолинита и полным его отсутствием, и высококачественного метакАОлина на прочность цементного камня. Показано, что на основе термоактивации распространенных полиминеральных глин и последующего их помола могут быть получены пуццоланы, не уступающие по активности метакАОлину.

**Abstract.** The introduction of mineral additives to binders, especially to Portland cement, is one of the promising trends for solving the resource and energy saving problems, as well as problems of environmental protection during production and application. Expanding the supplementary cementitious materials resource base can be achieved through the use of natural pozzolans and thermally activated polymineral clays (commonly known as glinites in Russia). One type of glinite is metakaolin, which is obtained by calcination of kaolin clays. Metakaolin is widely and effectively used as a pozzolanic additive due to its beneficial effect on the physical and mechanical properties of Portland cement-based materials. The obstacle to its wide production and use are the limited deposits of pure kaolin clays in many countries, including the Russian Federation. In this respect, the studies of pozzolanic activity of the most common mineral clays and their use in some countries have significantly advanced. Similar studies were widely performed in the 1940s in USSR. It seems reasonable to renew this trend to provide a scientific base for the production of local pozzolans made of clays commonly used in different regions. Comparative studies of the effect of 5 clays differing in mineral and chemical composition, calcination temperature and specific surface area, and high-quality metakaolin, on the strength of hardened Portland cement paste have been performed. It has been established that introducing 5...10 % of composite clays calcined at 400...8000 C° and milled to a specific surface area of 290...800 m<sup>2</sup>/kg into Portland cement enhanced the strength of the hardened cement paste considerably better than the introduction of metakaolin with a specific surface area of 1200 m<sup>2</sup>/kg. The findings of the study suggest that many kinds of commonly used polymineral clays have a specific calcination temperature and dispersity, which results in a higher pozzolanic activity compared with metakaolin.

## Введение

Наполнители из глинистых материалов широко применяются во многих отраслях, в частности, при производстве бумаги, красок, клеев, керамики, резины, линолеума, вяжущих веществ и композиционных материалов [1]. Еще более полувека назад американский исследователь Р.Е. Грим отмечал, что, судя по тенденции развития промышленности, глины будут применяться все чаще, и что на эту проблему должна быть направлена энергия исследователей [2]. Это предложение актуально и в настоящее время, особенно для строительной отрасли и промышленности строительных материалов как наиболее материалоемких. Введение минеральных добавок в вяжущие, в частности, в портландцемент, является одним из актуальных направлений решения проблем ресурсо- и энергосбережения и экологии в производстве и применении строительных материалов [3]. Наиболее широко применяемые в настоящее время в качестве минеральных добавок доменный шлак и топливная зола доступны не во всех странах и образуются в гораздо меньших объемах, чем производится портландцемент. Поэтому расширение сырьевой базы минеральных добавок может быть достигнуто за счет использования натуральных пуццоланов и активированных глин [4].

Наполнители из прокаленных и обожженных до частичного или полного спекания глин с древних времен находят применение в качестве тонкомолотых пуццолановых добавок в цементные и известковые вяжущие и материалы и изделия на их основе [5–7].

Глины – повсеместно распространенное, доступное и дешевое сырье для получения пуццоланов. Термически активированные глины классифицируются европейским стандартом EN 197–1–2000 как искусственные пуццоланы.

Выявлено, что частичная замена цемента термоактивированной глиной значительно улучшает стойкость цементного камня к сульфатам при погружении его в 5 % раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  [8] и является весьма эффективным для уменьшения щелочного кремнеземистого расширения [9].

Обожженные глины применяются в виде цемянки, глинита, горелых пород, аглопорита, керамзита и керамзитовой пыли [7, 10]. Глинит получают измельчением обожженных глин при температурах 600...800 °С [7, 11]. В последнее время определенное применение в качестве пуццолановой добавки для улучшения физико-технических свойств цементных композитов получила одна из разновидностей глинита – метакаолин, который представляет собой продукт термической обработки каолиновых глин с высоким содержанием минерала каолинита [12–14]. В состав качественных сортов метакаолина входит 50...55 %  $\text{SiO}_2$  и 40...45 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [14–15]. Утверждается, что его высококачественные разновидности с минимальным содержанием примесей, как правило, превосходят микрокремнезем в отношении пуццоланической активности [16].

Выявлено положительное влияние добавок метакаолина на свойства бетонной смеси и бетона. При их использовании улучшается удобоукладываемость и повышается устойчивость к водоотделению, уменьшается расход пластифицирующей добавки, увеличивается прочность, снижаются усадочные деформации; повышаются долговечность, морозостойкость и стойкость к воздействию щелочей и кислот, в частности, серной, соляной и уксусной [13, 17–18].

Определенным препятствием для широкомасштабного производства и применения метакаолина как пуццолана является ограниченность месторождений и запасов чистых каолиновых глин во многих странах, в том числе и в России. В связи с этим в последнее десятилетие в ряде стран были проведены исследования пуццоланической активности иных термообработанных глинистых минералов и возможностей получения пуццолановых добавок из глинистого сырья с различным содержанием каолинита или полным его отсутствием, то есть повсеместно распространенных обычных глин. Применение таких прокаленных глин получает распространение в развитых странах [19]. Выявлено [20], что некоторые термоактивированные глинистые минералы повышают степень гидратации цемента в большей степени, чем каолинит. Установленные особенности активности прокаленных глинистых минералов привели в последние два десятилетия к расширению исследований пуццолановой активности различных по составу глин [5, 19–20].

В начале 40–х гг. XX века Всесоюзным научно-исследовательским институтом цемента (ВНИИЦ) были проведены масштабные и систематические исследования пуццоланической активности распространенных на территории СССР 207 разновидностей глин, среди которых были и каолиновые [9]. В числе отдельных их результатов отмечается, что все глины, подвергнутые обжигу при температуре 500...800 °С, обнаруживают пуццоланические свойства в той или иной

Gaifullin A.R., Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. The influence of clay additives in Portland cement on the compressive strength of the cement stone

степени. Из 207 разновидностей глин только 24 (11 %) оказались непригодными для получения продукта с достаточной гидравлической активностью; из 12 прокаленных глин с наиболее высокой пуццолановой активностью 9 мергелистые и лишь 3 – высококаолиновые.

Учитывая вышесказанное, очевидна целесообразность возобновления исследований и разработок в этом направлении для создания научной базы организации производства пуццолановых добавок на основе местных распространенных глин с полным учетом их минерального состава во многих регионах.

Ниже приведены результаты исследований влияния добавок прокаленных и молотых полиминеральных глин различного минерального и химического состава в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня в сравнении с влиянием добавок метаксаолина.

### *Материалы и методы исследования*

В данном исследовании применялись следующие материалы.

1. Для получения глинистых были использованы полиминеральные глины различного химического и минерального составов по названиям месторождений: Ново-Орская (НОГ) и Нижне-Увельская (НУГ) в Оренбургской области, Арская (АГ), Сарай-Чекурчинская (СЧГ) и Кошакская (КГ) – в Республике Татарстан.

В таблицах 1 и 2 приведены химический и минеральный составы принятых при исследовании глин.

2. Метаксаолин ВМК производства ООО «Синерго» (Магнитогорск) (ТУ 572901–001–65767184–2010). Химический состав метаксаолина, в %:  $\text{SiO}_2$  – 51.4;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  > 42;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0.8;  $\text{H}_2\text{O}$  < 0.5; п.п.п. < 1. Удельная поверхность – 1200 м<sup>2</sup>/кг.

3. Портландцемент. Для определения пуццоланической активности глинистых термоактивированных наполнителей использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н (ПЦ500 Д-0-Н). Химический состав цемента, масс, %: CaO – 63;  $\text{SiO}_2$  – 20.5;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 4.5;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 4.5;  $\text{SO}_3$  – 3. Минералогический состав цемента:  $\text{C}_3\text{S}$  – 67.0;  $\text{C}_2\text{S}$  – 11.0;  $\text{C}_3\text{A}$  – 4.0;  $\text{C}_4\text{AF}$  – 15.0.

Показатели портландцемента: удельная поверхность – 345 м<sup>2</sup>/кг, насыпная плотность – 1300 кг/м<sup>3</sup>, нормальная густота – 26 %, начало схватывания – 2 часа 50 минут, конец схватывания – 4 часа 10 минут.

В работе применялись следующие методы исследования

1. Термоактивация глин.

Для каждой глины характерна своя оптимальная температура обжига, выше и ниже которой активность продукта падает [7]. Известно утверждение, что чем ниже температура обжига, тем выше активность глинистых материалов, так как при повышенных температурах диффузионный процесс приводит к их рекристаллизации [22].

Переход в активную форму у отдельных глинистых минералов начинается с 320...400 °С и продолжается до 800 °С [11, 23]. В связи с этим исследовалось влияние на свойства цементного камня добавок глинистых, полученных обжигом глин при температурах 400 °С, 600 °С и 800 °С.

Скорость подогрева составляла соответственно 1.7; 2.5 и 3.3 °С в минуту до температуры изотермической выдержки, которая составила 3 часа.

2. Прокаленные глины подвергались помолу в лабораторной мельнице МПЛ-1 до удельной поверхности 250, 500 и 800 м<sup>2</sup>/кг. Удельная поверхность молотых глинистых определялась с использованием прибора ПСХ-9.

3. Влияние добавок глинистых в портландцемент на прочность цементного камня при сжатии определялась по результатам испытаний образцов размерами 2 x 2 x 2 см. Образцы изготавливались из теста нормальной густоты, которая у бездобавочного цемента составила 26 %, с 5 % добавок глинистых – 27 %, с 10 % добавок глинистых – 27.5 %. Глинистые вводились в портландцемент в количестве 5, 10, 15 и 20 %. Образцы выдерживались в течение 24 часов в нормально-влажностных условиях, а затем подвергались тепловлажностной обработке в пропарочной камере по режиму: 4 часа подогрев до 85 °С, изотермическая выдержка 6 часов, 3 часа охлаждение до 35...40 °С.

Таблица 1. Химический состав принятых при исследовании глин\*

№ п/п	Разновидность глин	H <sub>2</sub> O	Содержание в % на абсолютную сухую навеску												
			SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub> /S	ппп	сумма
1	НОГ	0.81	69.18	1.36	19.55	1.32	0.01	0.20	0.42	<0.3	0.92	0.10	<0.05	6.63	99.69
2	НУГ	0.66	66.79	0.98	20.71	1.63	0.04	0.62	0.41	<0.3	0.65	0.08	0.13	7.70	99.73
3	АГ	1.05	73.65	1.47	15.37	2.23	0.01	0.28	0.50	<0.3	0.55	<0.03	<0.05	5.63	99.67
4	СЧГ	3.41	68.52	0.86	13.42	6.18	0.10	1.33	1.66	1.20	1.82	0.09	<0.05	4.62	99.80
5	КГ	4.14	64.50	0.88	13.96	7.30	0.10	2.16	2.18	0.98	1.97	0.11	<0.05	5.66	99.80

\*Количественный химический состав глин определялся с использованием ARL OPTYMIX – спектрометра

Таблица 2. Минеральный состав принятых при исследовании глин\*

№ п/п	Разновидность глин	Минеральный состав в %							
		Кварц	Каолинит	Иллит	Слюда	Ортоклаз	Плагиоклаз	Смешанно-слоистый глинистый минерал	Хлорит
1	НОГ	41	51	8	-	-	-	-	-
2	НУГ	33	62	-	4	-	1	-	-
3	АГ	47	40	13	-	-	-	-	-
4	СЧГ	28	-	-	10	7	8	40	4
5	КГ	34	-	-	-	5	14	40	1

\*В структуре иллита до 10 % разбухающих слоев; смешанно-слоистый разбухающий минерал с содержанием неразбухающих слоев в СЧГ до 40 %, в КГ до 20 %. Расчет приведен на 100 % кристаллической фазы без учета возможного содержания рентгеноаморфной составляющей. Рентгенофазовый анализ глин проведен с использованием дифрактометра D8 Advance фирмы Bruker.

### Результаты исследований и их анализ

В таблицах 3–5 приведены результаты исследований изменения прочности при сжатии цементного камня в зависимости от содержания добавок метаксаолина и прокаленных при температурах 400 °С, 600 °С и 800 °С и молотых до удельных поверхностей 250 м<sup>2</sup>/кг, 500 м<sup>2</sup>/кг и 800 м<sup>2</sup>/кг глин, отличающихся химическим и минеральным составом.

По данным, приведенным на рисунке 1, прочность при сжатии цементного камня в МПа и в процентах по отношению к прочности бездобавочного цемента при содержании добавки метаксаолина в % по массе составила соответственно: 0 % – 57.3; 5 % – 74.0 (+29.1 %); 10 % – 62.9 (+9.8 %); 15 % – 52.3 (-8.7 %); 20 % – 50.7 (-11.5 %).

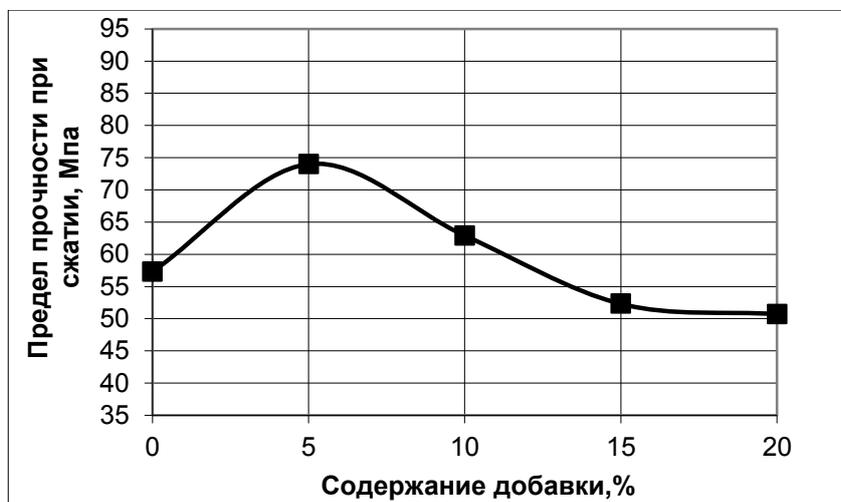


Рисунок 1. Зависимость прочности при сжатии цементного камня с добавками метаксаолина

Gaifullin A.R., Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. The influence of clay additives in Portland cement on the compressive strength of the cement stone

**Таблица 3. Прочность при сжатии цементного камня с добавками прокаленных и молотых до удельной поверхности 250 м<sup>2</sup>/кг глин**

№ п/п	% добавки	Т прокаливания, °С	С добавками прокаленных глин				
			НОГ	НУГ	АГ	СЧГ	КГ
1	2	3	4	5	6	7	8
			Предел прочности при сжатии МПа / % изменения прочности по сравнению с прочностью бездобавочного цементного камня				
1	-	-	57.3	57.3	57.3	57.3	57.3
2	5	400	69.0/+20	68.0/+19	61.4/+7	83.2/+42	72.3/+26
3	10		59.7/+4	70.9/+24	60.0/+5	79.0/+38	73.1/+26
4	15		51.0/-11	59.4/+4	53.6/-6	70.1/+22	72.9/+27
5	20		41.1/-28	46.4/-19	42.3/-25	64.1/+12	72.2/+26
6	5	600	76.0/+33	81.5/+42	77.5/+35	64.5/+13	75.1/+31
7	10		67.5/+18	87.6/+53	70.0/+22	63.5/+11	77.6/+35
8	15		58.0/+1	78.6/+37	58.3/+2	60.1/+5	76.9/+34
9	20		50.0/-13	66.6/+16	42.0/-27	56.1/-2	76.2/+33
10	5	800	80.5/+40	72.3/+26	48.1/-16	74.1/+29	58.5/+2
11	10		74.2/+30	76.5/+33	45.3/-21	70.5/+23	57.5/+0
12	15		63.5/+11	69.2/+21	44.8/-22	66.1/+15	57.1/-0
13	20		55.5/-3	55.8/-3	42.6/-26	60.1/+5	56.7/-1

**Таблица 4. Прочность при сжатии цементного камня с добавками прокаленных и молотых до удельной поверхности 500 м<sup>2</sup>/кг глин**

№ п/п	%, добавки	Т прокаливания, °С	С добавками прокаленных глин				
			НОГ	НУГ	АГ	СЧГ	КГ
1	2	3	4	5	6	7	8
			Предел прочности при сжатии МПа / % изменения прочности по сравнению с прочностью бездобавочного цементного камня				
1	-	-	57.3	57.3	57.3	57.3	57.3
2	5	400	58.0/+1	64.2/+12	70.6/+23	75.5/+32	71.8/+25
3	10		53.0/-8	58.1/+1	62.8/+10	65.5/+14	64.8/+13
4	15		45.0/-21	52.3/-9	57.0/-1	55.5/-3	56.1/-2
5	20		40.0/-30	52.3/-9	53.7/-6	48.3/-16	52.2/-9
6	5	600	64.2/+12	70.3/+23	90.3/+58	84.1/+47	82.5/+44
7	10		58.0/+1	64.3/+12	80.4/+40	73.1/+26	73.3/+28
8	15		53.0/-8	57.7/+1	70.7/+23	63.1/+10	65.1/+14
9	20		48.0/-16	56.9/-1	69.1/+21	55.1/-4	58.1/+1
10	5	800	90.0/+57	92.3/+61	86.8/+51	94.1/+64	61.1/+7
11	10		78.0/+36	82.1/+43	71.9/+25	86.1/+50	61.2/+7
12	15		64.3/+12	64.4/+12	63.3/+10	74.1/+29	53.3/-7
13	20		55.5/-3	62.8/+10	60.2/+5	65.2/+14	50.3/-12

**Таблица 5. Прочность при сжатии цементного камня с добавками прокаленных и молотых до удельной поверхности 800 м<sup>2</sup>/кг глин**

№ п/п	%, добавки	Т прокаливания, °С	С добавками прокаленных глин				
			НОГ	НУГ	АГ	СЧГ	КГ
1	2	3	4	5	6	7	8
			Предел прочности при сжатии МПа / % изменения прочности по сравнению с прочностью бездобавочного цементного камня				
1	-	-	57.3	57.3	57.3	57.3	57.3
2	5	400	56.0/-2	64.9/+13	74.6/+30	84.7/+48	60.6/+6
3	10		52.5/-8	56.3/-2	75.2/+31	75.5/+31	56.6/-1
4	15		44.5/-22	49.7/-13	62.0/+8	63.6/+11	52.2/-9
5	20		37.5/-35	46.3/-19	54.0/-6	52.1/-9	51.1/-11
6	5		600	60.0/+5	70.3/+23	60.6/+6	67.1/+17
7	10	58.0/+1		69.1/+21	59.6/+4	62.1/+8	66.6/+16
8	15	49.0/-15		57.6/+1	51.2/-11	52.3/-9	59.9/+5
9	20	42.0/-27		53.7/-7	44.9/-22	45.3/-21	55.5/-3
10	5	800	68.0/+19	66.8/+17	65.9/+15	94.6/+65	65.3/+14
11	10		64.5/+13	63.8/+11	64.0/+12	84.1/+47	60.0/+5
12	15		55.5/-3	53.4/-7	54.2/-5	68.1/-19	55.5/-3
13	20		45.5/-21	49.2/-14	48.0/-16	55.2/-4	51.1/-11

Анализ приведенных в таблицах 3–5 данных позволяет сделать следующие выводы. Из 180 разновидностей по содержанию добавок в портландцемент глинистов, полученных при обжиге при различных температурах и молотых до различных удельных поверхностей 5 разновидностей полиминеральных глин, 119 (66.1 %) обеспечили получение цементного камня с прочностью при сжатии, повышенной от долей процента до 65 % по сравнению с прочностью бездобавочного цементного камня; 108 (60 %) обеспечили получение цементного камня с прочностью при сжатии, превышающей от долей процента до 36 % прочность цементного камня с добавками 5...20 % метаксаолина.

У более чем 90 % разновидностей цементного камня с добавками 5...10 % глинистов прочность при сжатии превышает показатели бездобавочного цементного камня. Прочность такого камня выше прочности цементного камня с аналогичными по содержанию добавками метаксаолина у 53.3 % разновидностей образцов.

Образцы цементного камня с добавками 5...10 % глинистов превосходят по прочности образцы с добавкой метаксаолина на 53.3 %, а с 15...20 % – на 66.7 %. Нормальная густота цементной пасты при введении всех разновидностей термоактивированных глин при добавках 15 % и 20 % составила соответственно 27.0 % и 27.5 %.

По количеству разновидностей цементного камня с добавками глинистов на основе глины, превышающих по прочности при сжатии прочность, бездобавочного цементного камня, образцы расположились в ряд по убывающей: СЧГ, НУГ, НОГ, АГ, КГ; образцы цементного камня с добавками метаксаолина – СЧГ, АГ, КГ, НУГ, НОГ.

Известно, что пуццоланическая активность обожженных и молотых глин зависит от содержания и возможного синергетического влияния их минералов: глинистых – смешанно-слоистых, иллита, каолинита, хлорита; первичных – кварца, слюд, полевых шпатов; примесей солей и оксидов – кальцита, магнезита, гипса, пирита, серного колчедана и др., которые в минимальных количествах могут присутствовать в глинах [1]. Более высокую прочность, на 32...65 % по сравнению с прочностью бездобавочного цементного камня, имеют цементные камни с отдельными добавками 5...10 % обожженных как при температуре 400 °С, так и при 600...800 °С, молотых до тонкости помола как 250 м<sup>2</sup>/кг, так и 500...800 м<sup>2</sup>/кг глин различного минерального и химического составов.

## Заключение

В мировой практике в качестве минеральной добавки к портландцементу применяется метакаолин, сырьевая база каолиновых глин для производства которого является весьма ограниченной. В связи с этим в последнее время в различных странах ведутся исследования влияния искусственных, не уступающих по активности метакаолину, пуццоланов на основе термоактивированных повсеместно распространенных обычных полиминеральных глин.

В настоящей статье приведены результаты исследований в этом направлении в части сравнения влияния добавления в портландцемент глинистых глин на основе полиминеральных глин и высококачественного метакаолина на прочность при сжатии цементного камня, которые привели к следующим выводам.

1. Добавки в портландцемент отдельных глинистых глин на основе полиминеральных глин в зависимости от температуры активации и тонкости помола приводят к более значительному повышению прочности цементного камня, чем аналогичные по содержанию добавки высококачественного метакаолина.

2. Эффективные по активности глинистые глиниты могут быть получены при температурах прокаливания 400...600 °С, в то время как метакаолины получают при температуре обжига 700...800 °С.

3. Эффективные по активности глинистые глиниты могут быть получены при тонкости помола, меньшей в пять и более раз, чем у метакаолина.

4. Продолжение и расширение исследований в данном направлении может обеспечить создание научно-экспериментального обоснования организации производств эффективных пуццоланов на основе распространенных местных полиминеральных глин во многих регионах.

### Литература

1. Ramachandran V.S. (ed) *Concrete Admixtures Handbook – Properties*. New York: Science and Technology, 2nd ed. William Andrew Publishing. 1999. 964 p.
2. Crim P.E. *Clay mineralogy*. New York – London – Toronto: Mc Graw – Hill series in geology. 1953. 384 p.
3. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. Строительство и минеральные вяжущие прошлого, настоящего и будущего // Строительные материалы. 2013. №1. С. 124–128.
4. Scrivener K.L., Nonat A. Hydration of cementitious materials, present and future // *Cement and concrete research*. 2011. №41. Pp. 651–665.
5. Витрувий М. Десять книг об архитектуре. М.: Архитектура-С, 2006. 326 с.
6. Castello L. R., Hernandez H.J.F., Scrivener K.L., Antonic M. Evolution of calcined clay soils as supplementary cementitious materials // *Proceedings of a XII International Congress of the chemistry of cement*. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construction «Eduardo torroja». 2011. Pp. 117.
7. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества, технология и свойства. М.: Стройиздат, 1979. 480 с.
8. Lea F.M. *The chemistry of Cement and Concrete*. Chemical Publishing Company. Inc., New York, 1971. 740 p.
9. Mehta R.K. Studies of Blended Cements Continuing Santorin Earth // *Cement and Concrete Research*. 1986. 11(4). Pp. 507–512.
10. Рахимов Р.З., Халиуллин М.И., Гайфуллин А.Р. Состав и пуццолановые свойства керамзитовой пыли // Академия. Архитектура и строительство. 2013. №4. С. 112–116.
11. Глинит-цемент: Сборник статей ВНИИЦ. М.-Л.: 1935. 171 с.
12. Siddigye R., Klaus I. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete // *Applied Clay Science*. 2009. Vol. 43. №3–4. Pp. 392–400.

### References

1. Ramachandran V.S. (ed) *Concrete Admixtures Handbook – Properties*. New York. Science and Technology. William Andrew Publishing. 1999. 964 p.
2. Crim P.E. *Clay mineralogy*. New York – London – Toronto. Mc Graw – Hill series in geology. 1953. 384 p.
3. Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R. *Stroitelstvo i mineralnyye vyazhushchiye proshlogo, nastoyashchego i budushchego [Building and mineral binders of past, present and future]*. *Stroitel'nye Materialy*. 2013. No. 1. Pp. 124–128. (rus)
4. Scrivener K.L., Nonat A. Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and concrete research*. 2011. No. 41. Pp. 651–665.
5. Vitruvius M. *Desyat knig ob arkhitekture* [Ten books about architecture]. Moscow. Arkhitektura-S. 2006. 326 p. (rus)
6. Castello L. R., Hernandez H.J.F., Scrivener K.L., Antonic M. Evolution of calcined clay soils as supplementary cementitious materials. *Proceedings of a XII International Congress of the chemistry of cement*. Madrid. Instituto de Ciencias de la Construction «Eduardo torroja». 2011. Pp. 117.
7. Volzhenskiy A.V., Burov Yu.S., Kolokolnikov V.S. *Mineralnyye vyazhushchiye veshchestva, tekhnologiya i svoystva* [Mineral binding materials: technology and properties]. Moscow. Stroyizdat. 1979. 480 p. (rus)
8. Lea F.M. *The chemistry of Cement and Concrete*. Chemical Publishing Company. Inc. New York. 1971. 740 p.
9. Mehta R.K. Studies of Blended Cements Continuing Santorin Earth. *Cement and Concrete Research*. 1986. No. 11(4). Pp. 507–512.
10. Rakhimov R.Z., Khaliullin M.I., Gayfullin A.R. *Sostav i putstsolanovyye svoystva keramzitovoy pyli* [Composition and pozzolatic properties of haydite dust]. *Akademiya. Arkhitektura i stroitelstvo*. 2013. No. 4. Pp. 112–116. (rus)
11. *Glinite-tsement. Sbornik statey VNIITs* [Glinite-cement: collection of papers of VNIITs]. 1935. 171 p. (rus)

Гайфуллин А.Р., Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р. Влияние добавок глинистых глин в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня

13. Брыков А.С. Метакаолин // Цемент и его применение. 2012. №7–8. С. 36–41.
14. Badogiamics S., Kakali G., Tsvivilis S. Metacaolin as supplementary cementitious material. Optimization of kaolin to metakaolin conversion // J. Therm. Anal. Calorim. 2005. Vol. 81. №2. Pp. 457–462.
15. Habert G., Choupay N., Escadeillas G., Guillame D. [et al.] Clay content of argillites influence on cement based mortars // Applied Clay Science. 2009. Vol. 43. №3–4. Pp. 322–330.
16. Rashad A.M. Metakaolin as cements material: History, scours production and composition. A comprehensive overview. // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 41. Pp. 303–318.
17. Advanced Concrete Technology Constituent Materials / Eds J. Newnan, B. S. Chio. Elsevier, 2003. 280 p.
18. Concrete Construction Engineering Handbook. CRC Press, 2008. 1586 p.
19. He C., Osbaeck B., Makovicky E. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects // Cement and Concrete Research. 1995. Vol. 25. Pp. 1961–1702.
20. Ambroise J., Murat M., Pera J. Hydration reaction and hardening of calcined and related minerals: Extension of the research and general conclusions // Cement and Concrete Research. 1985. Vol. 15. Issue 2. Pp. 261–268.
21. Fernandez R., Martirena F., Scrivener K.L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between Kaolinite, illite and montmorillonite // Cement and Concrete Research. 2001. Vol. 41 (1). Pp. 113–122.
22. Канаев В.К. Новая технология строительной керамики. М.: Стройиздат, 1990. 264 с.
23. Langier-Kazniarowa A. Termogramy mineralow ilastych. Warchawa, 1967. 316 p.
12. Siddigye R., Klaus I. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete. *Applied Clay Science*. 2009. Vol. 43. No. 3–4. Pp. 392–400.
13. Brykov A.S. Metakaolin [Metakaolin]. *Cement and its Applications*. 2012. No. 7–8. Pp. 36–41. (rus)
14. Badogiamics S., Kakali G., Tsvivilis S. Metacaolin as supplementary cementitious material. Optimization of kaolin to metakaolin conversion. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2005. Vol. 81. No. 2. Pp. 457–462.
15. Habert G., Choupay N., Escadeillas G., Guillame D. et al. Clay content of argillites influence on cement based mortars. *Applied Clay Science*. 2009. Vol. 43. No. 3–4. Pp. 322–330.
16. Rashad A.M. Metakaolin as cements material: History, scours production and composition. A comprehensive overview. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 41. Pp. 303–318.
17. *Advanced Concrete Technology Constituent Materials*. Elsevier. 2003. 280 p.
18. *Concrete Construction Engineering Handbook*. CRC Press. 2008. 1586 p.
19. He C., Osbaeck B., Makovicky E. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research*. 1995. Vol. 25. Pp. 1961–1702.
20. Ambroise J., Murat M., Pera J. Hydration reaction and hardening of calcined and related minerals: Extension of the research and general conclusions. *Cement and Concrete Research*. 1985. Vol. 15. Issue 2. Pp. 261–268.
21. Fernandez R., Martirena F., Scrivener K.L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between Kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 41 (1). Pp. 113–122.
22. Kanayev V.K. *Novaya tekhnologiya stroitelnoy keramiki* [New technology of building ceramics]. Moscow. Stroyizdat. 1990. 264 p. (rus)
23. Langier-Kazniarowa A. *Termogramy mineralow ilastych*. Warchawa. 1967. 316 p.

Альберт Ринатович Гайфуллин,  
+7(927)4447044; эл. почта: 447044@list.ru

Albert R. Gaifullin,  
+7(927)4447044; 447044@list.ru

Равиль Зуфарович Рахимов,  
+7(43)2380302; эл. почта: caf.str.mat@yandex.ru

Ravil Z. Rakhimov,  
+7(43)2380302; caf.str.mat@yandex.ru

Наиля Равилевна Рахимова,  
+7(906)3234529; эл. почта: rahimova.07@list.ru

Nailia R. Rakhimova,  
+7(906)3234529; rahimova.07@list.ru

© Гайфуллин А.Р., Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р., 2015

doi: 10.5862/MCE.59.8

## Compressive strength of concrete with millet husk ash (MHA) as a partial replacement for cement

### Прочность при сжатии бетона с золой лузги проса в качестве частичного заменителя портландцемента

**S.M. Auta,***Federal University of Technology Minna, Minna,  
Nigeria;***A.J. Shiwua,***St. Petersburg State University of Architecture and  
Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia;***T.Y. Tsado,***Federal University of Technology Minna, Minna,  
Nigeria***PhD C.M. Аума,***Федеральный технологический университет  
Минны, Минна, Нигерия***аспирант А.Д. Шивуа,***Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, Россия***PhD Т.Е. Тсадо,***Федеральный технологический университет  
Минны, Минна, Нигерия*

**Key words:** compressive strength; concrete aggregates; millet husk ash; replacement for Portland cement

**Ключевые слова:** прочность на сжатие; заполнители для бетона; зола лузги проса; заменитель портландцемента

**Abstract.** A study of compressive strength of concrete with millet husk ash (MHA) as partial replacement for ordinary Portland cement (OPC) is presented. The strength characteristics was investigated by casting and testing 54 specimen cubes sizing 100 mm x 100 mm x 100 mm for varied percentage replacements of cement (0 %, 10 % and 20 %) with water cement ratio of 0.65. These cubes were cured for 7 days, 14 days, 28 days and 35 days to target strength design of 25 N/mm<sup>2</sup> at 35 days crushing. The result shows that at 35 days the compressive strength for 0 %, 10 % and 20 % replacements are 32.00 N/mm<sup>2</sup>, 25.56 N/mm<sup>2</sup>, and 23.18 N/mm<sup>2</sup>, respectively. It is clear that MHA as a pozzolanic material can be incorporated into cement in amounts of no more than 10 % replacement in order to develop a good and hardened concrete.

**Аннотация.** В статье представлено исследование прочности при сжатии бетона с золой лузги проса, рассматриваемого как частичная замена обычного портландцемента. Прочностные характеристики исследовали методом литья и испытания 54 образцов кубов размерности 100 x 100 x 100 мм для разнообразных процентных замен цемента (0 %, 10 % и 20 %) с водоцементным соотношением 0.65. Эти кубики были выдержаны 7 дней, 14 дней, 28 дней и 35 дней для достижения прочности конструкции 25 Н/мм<sup>2</sup> в возрасте 35 дней. Результат показывает, что в возрасте 35 дней при процентной замене портландцемента на цемент с золой 0 %, 10 % и 20 % прочность при сжатии составляет 32.00 Н/мм<sup>2</sup>, 25.56 Н/мм<sup>2</sup>, и 23.18 Н/мм<sup>2</sup> соответственно. Очевидно, что для получения бетона удовлетворительного качества зола лузги проса в качестве пуццоланового материала может быть использована в цементе в количестве не более 10 %.

### Introduction

Concrete basically consists of cement, fine and coarse aggregates, water for mixing, and sometimes admixtures are added, such as air entraining agents, plasticizers and pozzolans [1].

Many materials are added to a concrete mix to improve its properties in both fresh and hardened states, serving the same purpose as cement and making work with concrete easier while being economically efficient. Other areas that are being explored to attain cost-effectiveness of concrete include the use of recycled solid wastes, agricultural wastes and industrial wastes like fly ash, blast furnace slag, silica fume, rice husk ash, wood ash, etc [2–4].

The use of any particular waste will be tied to its abundance or availability and cost-effectiveness of production. The usage of these environmental wastes as partial replacement for ordinary Portland cement (OPC) in concrete production calls for intensive research into the characteristics of modified concrete. Most of these materials are called pozzolans [5–8].

Аута С.М., Шивуа А.Д., Тсадо Т.Е. Прочность при сжатии бетона с золой лузги проса в качестве частичного заменителя портландцемента

Neville [8] states that the term pozzolan is used to describe naturally occurring and artificial siliceous or aluminous materials which in themselves possess little or no binding values but within finely divided form and in the presence of moisture will chemically react with calcium oxide at ordinary temperature to form compound possessing binding properties. The pozzolanic reaction may be slower than the rest of the reactions that occur during cement hydration, and thus the short-term strength of concrete made with pozzolans may not be as high as that of concrete made with purely binding materials; conversely, highly reactive pozzolans, such as silica fume and high reactivity metakaolin can produce "high early strength" concrete, which increases the rate at which concrete gains strength with aging [9–12].

Typical natural pozzolana are now so abundant and recognized that some of them, like fly-ash, are covered by code of practice specifications [13]. Other well-known natural pozzolana are granulated blast furnace slag and silica fume which can be used individually with Portland or blended cement or in different combinations as presented by Talero [14]. These pozzolana react with calcium hydroxide ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) released by the chemical reactions of the tricalcium silicate and dicalcium silicate with water in the cement hydration process to form binding materials. It is for this reason that the materials are of significance in engineering, i.e. they are often added to concrete to produce mixes that are not only economical but also reduce permeability, may increase strength and influence other concrete properties. Neville [9] grouped pozzolana into two main classes, namely, natural and artificial. Though the natural and artificial classes have similar pozzolana activity, they differ greatly from one another in origin, but slightly in chemical and mineralogical constituents.

Although the addition of pozzolana to Portland cement does not contribute to the compressive strength of concrete at early ages, strengths similar to those of ordinary Portland cement can be expected at later ages provided the cement is cured under moist conditions for a sufficient period [15].

Hossain [16] states that the Kenya standard (KS-02-1261) recommends that a good pozzolana for manufacture of pozzolanic cement should have a combination of  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  of at least 70 %. The ASTM C618 [13] on the other hand requires that a good pozzolana should have a combined percentage of  $\text{SiO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  of more than 70 %. Some of the advantages of using pozzolanic material as partial replacement of cement are listed by Hussain [16] and include improved workability; improved sulphate resistance, particularly in marine environments; improved resistance to freezing and thawing in temperate environments; increased cohesiveness or bonding strength of the concrete; increased long-term strength; reduction in water content of mortar and concrete mixes resulting in less shrinkage and cracking; increased potent advantage in hot weather concreting; decreased permeability and water tightness; and high resistance to alkaline-aggregate reactions.

**Table 1. Leading millet producers, 2014 [17]**

Country Ranking	Production	
	Quantity in Metric Tons	Percentage (%) total
India	10000	35.2
Nigeria	4800	16.9
Niger	3200	11.3
China	1800	6.3
Mali	1600	5.6
Sudan	1085	3.8
Burkina Faso	1038	3.7
Uganda	820	2.9
Ethiopia	750	2.6
Chad	683	2.4
Others	3419	12.1

One of these pozzolanic materials is the millet husk ash (MHA) which is the focus of this work. Availability of millet production is presented in Table 1. World millet production stands at around 30 million metric tons annually. For millions of people in the semi-arid tropics of Asia and Africa, millets along with Sorghum are the most important staple foods. Around 90 % of this annual figure is utilized in developing countries and only a very tiny fraction is used by developed countries. India, Nigeria, Niger, China, Mali, Sudan, Burkina Faso, Uganda, Ethiopia, and Chad are estimated to account for over 80 % of global millet utilization [17]. As a result of the abundance of this agricultural produce in Nigeria, mostly the husks are not used for any reasonable purpose and are instead burnt or left to decay. This is why this

Auta S.M., Shiwua A.J., Tsado T.Y. Compressive strength of concrete with millet husk ash (MHA) as a partial replacement for cement

paper focuses on harnessing this agro-waste by assessing the strength property of the MHA when partially replacing cement in concrete.

### Materials and methods

The materials used include ordinary Portland cement (OPC) substituted partially with MHA; sharp sand; crushed granite and water. The material preparations took place at the Gidan Kwano campus of Federal University of Technology, Minna, and proceeded with sourcing sharp sand used as a fine aggregate. The binder (cement) used for this project work is partially replaced by MHA. The cement obtained from an open market in Minna was Ordinary Portland Cement (Dangote). While the millet husks were obtained from a Kontangora farm in Niger State and burnt under controlled conditions within the university's premises in Gidan Kwano Campus to obtain the ash. Crushed granite used as coarse aggregates were obtained from a quarry site at Takun Pada, Minna, Niger State, Nigeria.

The methodology included laboratory experiments and this consisted of preparing and testing fresh and hardened concrete specimens of normal concrete and MHA concrete. All the samples were tested based on laboratory preliminary tests with sieve analysis of fine aggregate and coarse aggregate, specific gravity of fine aggregate and coarse aggregate, moisture content of fine aggregate, slump test and compressive strength test carried out according to standard specification.

A total of 72 concrete samples of 100 x 100 x 100 mm dimensions were cast. The percentage of substituting the cement with MHA varied at 0 %, 10 % and 20 % of cement and values of their respective compressive strengths were taken at 7 days, 21 days, 28 days, and 35 days of hydration periods [18]. The conventional procedure at 14 days was be skipped and replaced with crushing at 35 days because studies have shown that pozzolanic materials result in concrete of lower strength in the early ages and that strength similar to those of ordinary Portland cement can be expected at later ages provided the cement is cured under moist conditions for a sufficient period [10–13, 15]. The compressive strength of the samples was determined after the specified curing periods and demoulding according to the standards specification [18–20].

### Results and discussion

Results of the tests carried out, such as sieve analysis, specific gravity, natural moisture content, bulk density, workability test, and compressive strength, are presented in Tables 2, 3, 4 and Figures 1 and 2, respectively. The result of sieve analysis for sharp sand as presented in Figure 1 was carried out in accordance to BS [21] with a fineness modulus of 3.03 classified as finely graded. The fineness modulus for crushed granite rock gives 2.87 from the sieve analysis presented in Figure 2. The characteristics of the fine and coarse aggregates are given in Table 2 and 4, respectively. These components are: specific gravity; bulk density; moisture content; and fineness modulus for sharp sand all within specifications of the standards [22–25].

The characteristics of MHA concrete are presented in Table 4. It is evident that with an increase in percentage of MHA replacement, there is a decrease of slum indicating a reduction of workability. However, all values of slum fall within 10 mm to 30 mm [26], which can be classified as medium workability, even though the workability decreases with an increase in MHA replacement concrete. The maximum compressive strength of 32.0 N/mm<sup>2</sup> was obtained after a 35 days curing period for 0 % MHA replacement and 25.56 N/mm<sup>2</sup> at 10 %, but 23.18 N/mm<sup>2</sup> was obtained at 20 % replacement (Figure 3).

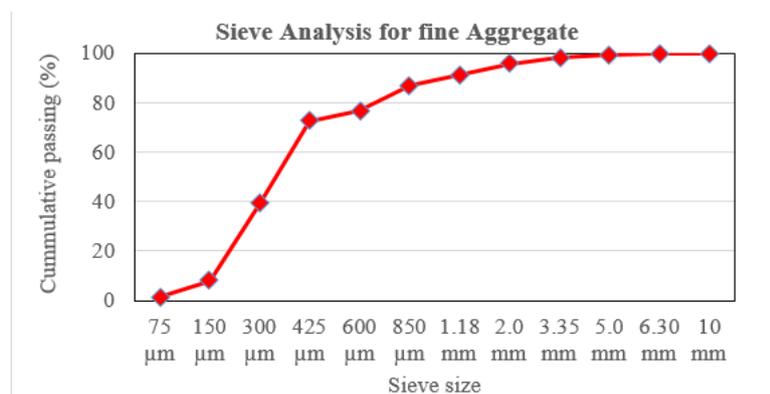


Figure 1. Particle size distributions for fine aggregate (sharp sand)

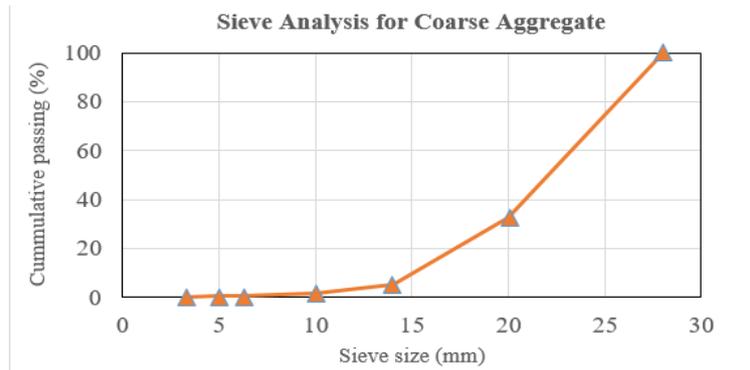


Figure 2. Particle size distribution for coarse aggregate (crushed granite)

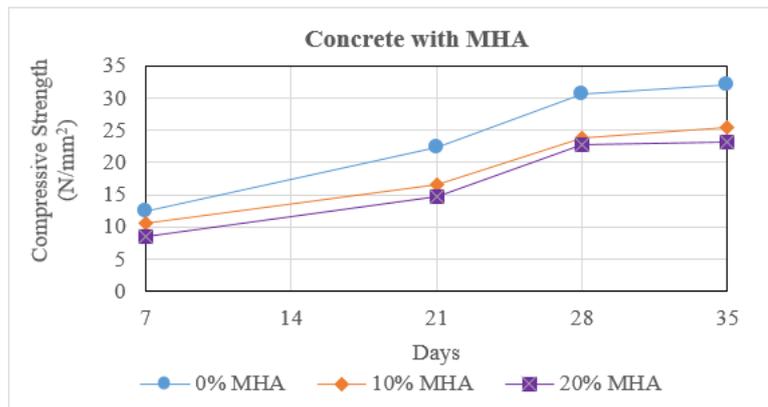


Figure 3. Variation of compressive strength with percentage MHA content

Table 2. Characteristics of Fine Aggregate

No.	Test	Result	BS requirement
1	Specific Gravity	2.53	2.6...3.0 [22]
2	Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	1368.0	1300...1700 [23]
3	Moisture Content (%)	8.40	5...15 [24]
4	Fineness Modulus (FM) from standard sieves only.	3.03	2.0...3.3 [25]

Table 3. Characteristics of Coarse Aggregate

No.	Test	Result	BS requirement
1	Specific Gravity	2.80	2.4...2.8 [22]
2	Bulk Density (kg/m <sup>3</sup> )	1570.31	1300...1800 [23]
3	Moisture Content (%)	1.76	1...5 [24]
4	Fineness Modulus (FM) from standard sieves only	2.87	5.5...8.0 [25]

Table 4. Characteristics of MHA Concrete

No.	Test	% of MHA replacement Result			
		0 %	10 %	20 %	
1	Mix Proportion, Cement/MHA: fine aggregate: coarse aggregate	1:2:4	1:2:4	1:2:4	
2	Water cement ratio (w/c)	0.65	0.65	0.65	
3	Slum in (mm)	28.5	22.4	18.7	
4	Number of cubes cast	7 days	6	6	6
		21 days	6	6	6
		28 days	6	6	6
		35 days	6	6	6

No.	Test	% of MHA replacement Result			
		0 %	10 %	20 %	
5	Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )	7 days	12.36	10.67	8.48
		21 days	22.38	16.68	14.68
		28 days	30.71	23.86	22.73
		35 days	32.00	25.56	23.18

The average compressive strengths at 7 days, 21 days, 28 days and 35 days for 0 % MHA replacement are as represented in Table 4. The result shows that with an increase in days of curing, the compressive strength of various replacements percentages generally increases. It is also observed that the more the replacement percentage of MHA, the lesser the strength of the concrete irrespective of the hydration periods. However, the design strength of 25 N/mm<sup>2</sup> was achieved for a much later hydration period, as evident and attained in the curing period of 35 days with 10 % MHA replacement, thus giving a compressive strength of 25.56 N/mm<sup>2</sup>.

### Conclusions

This work has presented the compressive strength study of concrete with MHA as partial replacement for cement at 25.56 N/mm<sup>2</sup> with a 10 % replacement. By this study, one vital ways of harnessing naturally abundant agricultural waste in the form of Millet Husk which otherwise could have been, environmentally, hazardous has been achieved. Rather than lay wasted, it could be transformed into useful building material especially, where MH material is readily available and in abundance. The following conclusions can be drawn: it is feasible to use MHA as an alternative pozzolanic material alongside with conventional cement; MHA can be blended in small amounts between 0 % and 10 % replacement by weight or volume of cement in concrete production and concrete works; we recommend that MHA replacement should not be greater than 10 %, especially for major concrete works and the replacement should be strictly supervised; a replacement of cement with 20 % MHA is not advisable for major concrete work, since the percentage drop in concrete strength is great; further work can be carried out to include curing periods up to 90 days, re-vibration of MHA concrete and some other physical properties in order to standardize its application in the construction industry. In addition, cost analysis can be incorporated for MHA and OPC concrete to ascertain concrete production with a lower cost.

### References

- Alao T.O. Rational design of concrete mixes using uncrushed aggregates. *Procs 4th West Africa Built Environment Research (WABER) Conference*, 24-26 July 2012, Abuja, Nigeria. Pp. 251–261.
- Oyekan G.L., Kamiyo O. M. Effect of Nigerian rice husk ash on some engineering properties of concrete and sandcrete blocks. *Proceedings of 32nd Conference on Our World in Concrete & Structures*. Singapore, 2007. Pp. 28–29.
- Elinwa A.U., Mahmood Y.A. Ash from Timber Waste as Cement Replacement Material. *Cement and Concrete Composites*. 2002. Vol. 24. No. 2. Pp. 219–222.
- Monzo J, Borrachero J.M.V, Peris-Mora E., Ordonez L.M. Studies on crystalline rice husk ashes and the activation of their pozzolanic properties. *Wast Manage. Series*. 2000. 1. Pp. 493–503.
- Nwofor T. C., Sule S. Stability of groundnut shell ash (GSA)/Ordinary Portland cement (OPC) Concrete in Nigeria. *Pelagia Research Library Advances in Applied Science Research*. 2012. 3(4). Pp. 2283–2287.
- Opeyemi D. A., Makinde O.O. The Suitability of partial replacement of cement with rice husk ash and bone powder in concrete structures. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012. 2(9). Pp. 261–265.
- Tashima M., Da Silva C.A.R., Akasaki J.L., Beniti Barbosa M. The possibility of adding the Rice Husk Ash (RHA) to the concrete. *Proceedings of the 2004, International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*. 2004. Pp. 778–786.
- Ettu L.O., Osadebe N.N., Mbajiorgu M.S.W. Suitability of

### Литература

- Alao T.O. Rational design of concrete mixes using uncrushed aggregates // *Procs 4th West Africa Built Environment Research (WABER) Conference*, 24-26 July 2012, Abuja, Nigeria. Pp. 251–261.
- Oyekan G.L., Kamiyo O. M. Effect of Nigerian rice husk ash on some engineering properties of concrete and sandcrete blocks // *Proceedings of 32nd Conference on Our World in Concrete & Structures*. Singapore, 2007. Pp. 28–29.
- Elinwa A.U., Mahmood Y.A. Ash from Timber Waste as Cement Replacement Material // *Cement and Concrete Composites*. 2002. Vol. 24. No. 2. Pp. 219–222.
- Monzo J, Borrachero J.M.V, Peris-Mora E., Ordonez L.M. Studies on crystalline rice husk ashes and the activation of their pozzolanic properties // *Wast Manage. Series*. 2000. 1. Pp. 493–503.
- Nwofor T. C., Sule S. Stability of groundnut shell ash (GSA)/Ordinary Portland cement (OPC) Concrete in Nigeria // *Pelagia Research Library Advances in Applied Science Research*. 2012. 3(4). Pp. 2283–2287.
- Opeyemi D. A., Makinde O.O. The Suitability of partial replacement of cement with rice husk ash and bone powder in concrete structures // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012. 2(9). Pp. 261–265.
- Tashima M., Da Silva C.A.R., Akasaki J.L., Beniti Barbosa M. The possibility of adding the Rice Husk Ash (RHA) to the concrete // *Proceedings of the 2004, International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*. 2004. Pp. 778–786.
- Ettu L.O., Osadebe N.N., Mbajiorgu M.S.W. Suitability of

Аута С.М., Шивуа А.Д., Тсадо Т.Е. Прочность при сжатии бетона с золой лузги проса в качестве частичного заменителя портландцемента

- Nigerian agricultural by-products as cement replacement for concrete. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2013. 3(2). Pp. 1180–11085.
9. Neville A.M., Brooks J.J. *Concrete Technology, 2nd Edition*. Pearson education publisher limited, New Delhi India. 2002. 623 p.
  10. Rodryguez de Sensale G. Strength development of concrete with rice husk ash. *Cement & Concrete Composites*. 2006. No. 28. Pp. 158–160.
  11. Giaccio G., Rodryguez de Sensale G., Zerbino R. Failure mechanism of normal and high-strength concrete with rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*. 2007. 29(7). Pp. 566–574.
  12. Saraswathy V., Ha-Won S. Corrosion performance of rice husk ash blended concrete. *Construction and Building Materials*. 2007. 21(8). Pp. 1779–1784.
  13. ASTM C618. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
  14. Talero R. Qualitative Analysis of natural pozzolan, fly ash and blast furnace slags by XRD. *Journal of Material in Civil Engineering*. 1990. 2(2). Pp. 106–117.
  15. Bhanja S., Senguptab B. Investigation of the compressive strength of silica lime concrete using statistical methods. *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32. Issue 9. Pp. 1391–1393.
  16. Hossian K.M.A. Blended cement using volcanic ash and pumice. *Cement and Concrete Research Composites*. 2003. 33(10). Pp. 1601–1605.
  17. Millet Production by Country in 1000 MT – Country Rankings. [online] Available at: <http://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=millet&graph=production> (Accessed 4 Sep. 2015).
  18. BS 1881: Part 111, *Method for normal curing of concrete*. BSI, London, UK. 1983.
  19. BS 1881: Part 115, *Specification for compressive test machines for concrete*. BSI, London, UK. 1983.
  20. BS 1881: Part 116, *Methods for determination of compressive strength of concrete cubes*. BSI, London, UK. 1983.
  21. BS 812: Part 103.1, *Methods for determination of particle size distribution – sieve test*. BSI, London, UK. 1985.
  22. BS 812: Part 107, *Methods for determination of particle density and water absorption*. BSI, London, UK. 1995.
  23. BS 812: Part 2, *Methods for determination of bulk densities of aggregate*. BSI, London, UK. 1995.
  24. BS 812: Part 109, *Methods for determination of moisture content*. BSI, London, UK. 1990.
  25. BS 882: 1992, *Specification for aggregates from natural sources for concrete*. BSI, London, UK. 1992.
  26. BS EN 12350-2, *Testing fresh concrete: slump test*. BSI, London, UK. 2000.
- Nigerian agricultural by-products as cement replacement for concrete // *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2013. 3(2). Pp. 1180–11085.
9. Neville A.M., Brooks J.J. *Concrete Technology, 2nd Edition*. New Delhi India, Pearson education publisher limited, 2002. 623 p.
  10. Rodryguez de Sensale G. Strength development of concrete with rice husk ash // *Cement & Concrete Composites*. 2006. No. 28. Pp. 158–160.
  11. Giaccio G., Rodryguez de Sensale G., Zerbino R. Failure mechanism of normal and high-strength concrete with rice husk ash // *Cement and Concrete Composites*. 2007. 29(7). Pp. 566–574.
  12. Saraswathy V., Ha-Won S. Corrosion performance of rice husk ash blended concrete // *Construction and Building Materials*. 2007. 21(8). Pp. 1779–1784.
  13. ASTM C618. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
  14. Talero R. Qualitative Analysis of natural pozzolan, fly ash and blast furnace slags by XRD // *Journal of Material in Civil Engineering*. 1990. 2(2). Pp. 106–117.
  15. Bhanja S., Senguptab B. Investigation of the compressive strength of silica lime concrete using statistical methods // *Cement and Concrete Research*. 2002. Vol. 32, Issue 9. Pp. 1391–1393.
  16. Hossian K.M.A. Blended cement using volcanic ash and pumice // *Cement and Concrete Research Composites*. 2003. 33(10). Pp. 1601–1605.
  17. Millet Production by Country in 1000 MT – Country Rankings. [Электронный ресурс] URL: <http://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=millet&graph=production> (Дата обращения: 04.09.2015).
  18. BS 1881: Part 111, *Method for normal curing of concrete*. BSI, London, UK, 1983.
  19. BS 1881: Part 115, *Specification for compressive test machines for concrete*. BSI, London, UK, 1983.
  20. BS 1881: Part 116, *Methods for determination of compressive strength of concrete cubes*. BSI, London, UK, 1983.
  21. BS 812: Part 103.1, *Methods for determination of particle size distribution – sieve test*. BSI, London, UK, 1985.
  22. BS 812: Part 107, *Methods for determination of particle density and water absorption*. BSI, London, UK, 1995.
  23. BS 812: Part 2, *Methods for determination of bulk densities of aggregate*. BSI, London, UK, 1995.
  24. BS 812: Part 109, *Methods for determination of moisture content*. BSI, London, UK, 1990.
  25. BS 882: 1992, *Specification for aggregates from natural sources for concrete*. BSI, London, UK, 1992.
  26. BS EN 12350-2, *Testing fresh concrete: slump test*. BSI, London, UK, 2000.

Samuel Mahuta Auta,  
+2348069289243; e-mail: smahuta@yahoo.com

Aondowase John Shiwua,  
+79216539599; e-mail: jshiwua@yandex.ru

Theophilus Yisa Tsado,  
+2348024681615; e-mail: teoaggie@yahoo.com

Самуэль Махута Аута,  
+2348069289243; e-mail: smahuta@yahoo.com

Аондовасе Джон Шивуа,  
+79216539599; e-mail: jshiwua@yandex.ru

Теофилюс Еса Тсадо,  
+2348024681615; e-mail: teoaggie@yahoo.com

## Требования к материалам, представляемым к публикации

Материалы принимаются только через систему электронной редакции журналов СПбГПУ. Авторам необходимо зарегистрироваться в системе (<http://journals.spbstu.ru/>) и подать статью через нее, предварительно ознакомившись с нижеприведенными требованиями и условиями опубликования. Публикация в журнале бесплатна для авторов.

### Этические нормы и авторские права

Подавая статью в журнал, автор соглашается на условия лицензионного договора, в частности, на то, что все статьи без исключения публикуются в открытом доступе на сайте журнала и в Научной электронной библиотеке России. Также автор подтверждает, что статья является оригинальной, ранее не опубликованной, содержит только проверенные и точные данные; любые данные, полученные не автором, имеют соответствующие ссылки на источник.

### Тематика статей

В «Инженерно-строительном журнале» публикуются оригинальные, ранее не опубликованные статьи, содержащие полученные авторами новые научные результаты, по тематике «Строительство». Статьи принимаются в тот или иной номер в соответствии с тематикой на текущее полугодие.

№	Дата выхода	Срок подачи материалов	Тема номера
8(60)	21.12.2015	13.11.2015	Ограждающие конструкции. Энергоэффективность зданий
1(61)	12.02.2015	25.12.2014	Строительные конструкции. Строительная механика
2(62)	01.04.2015	19.02.2015	Технология и организация строительства. Строительные материалы и изделия
3(63)	06.05.2016	14.03.2016	Гидротехническое строительство. Основания и фундаменты

### Структура и содержание статей

Обязательны следующие элементы статьи: введение, включающее обзор иностранной и отечественной литературы и постановку задачи; основная часть (описание исследования); заключение, включающее нумерованные выводы; список литературы; источник финансирования (если есть).

### Технические требования к статьям

Статьи подаются в формате docx (MS Word 2007–2013). Файл статьи, подаваемый через электронную редакцию, должен содержать только сам текст, без названия, списка литературы, фамилий и данных авторов. Все эти поля заполняются отдельно при подаче через электронную редакцию.

Рекомендуемый объем статей: от 15000 до 30000 знаков с пробелами. Таблицы выполняются средствами Word (не рисунками) и располагаются внутри текста статьи. Иллюстрации должны быть представлены в отдельных графических файлах (один рисунок – один файл). Допустимые форматы: JPEG, TIFF, BMP. В текстовый файл иллюстрации можно вставить для обозначения рекомендуемого места их использования.

Список литературы на русском языке должен быть оформлен в соответствии с ГОСТ 7.0.5-2008. Цитируемая литература приводится общим списком в конце статьи в порядке упоминания. Порядковый номер в тексте заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. Также к статье прилагается список литературы на латинице, оформленный в соответствии с инструкцией по транслитерации списка литературы, размещенной на сайте издания.

### Аннотация к статье

В журнал подается расширенная аннотация на двух языках: русском и английском. Особое внимание следует уделить аннотации на английском языке (если статья на русском). Аннотация должна повторять структуру статьи: актуальность, цель, методика, результаты, выводы. Аннотация должна содержать от 100 до 250 слов.

**Подробные требования к статьям см. на сайте журнала:**

<http://www.engstroy.spb.ru/autors.html>



Инженерно-строительный институт  
Центр дополнительных профессиональных программ

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29,  
тел/факс: 552-94-60, [www.stroikursi.spbstu.ru](http://www.stroikursi.spbstu.ru),  
[stroikursi@mail.ru](mailto:stroikursi@mail.ru)

Приглашает специалистов проектных и строительных организаций,  
**не имеющих базового профильного высшего образования**  
на курсы профессиональной переподготовки (от 500 часов)  
по направлению «Строительство» по программам:

**П-01 «Промышленное и гражданское строительство»**

Программа включает учебные разделы:

- *Основы строительного дела*
- *Инженерное оборудование зданий и сооружений*
- *Технология и контроль качества строительства*
- *Основы проектирования зданий и сооружений*
- *Автоматизация проектных работ с использованием AutoCAD*
- *Автоматизация сметного дела в строительстве*
- *Управление строительной организацией*
- *Управление инвестиционно-строительными проектами. Выполнение функций технического заказчика*

**П-02 «Экономика и управление в строительстве»**

Программа включает учебные разделы:

- *Основы строительного дела*
- *Инженерное оборудование зданий и сооружений*
- *Технология и контроль качества строительства*
- *Управление инвестиционно-строительными проектами. Выполнение функций технического заказчика и генерального подрядчика*
- *Управление строительной организацией*
- *Экономика и ценообразование в строительстве*
- *Управление строительной организацией*
- *Организация, управление и планирование в строительстве*
- *Автоматизация сметного дела в строительстве*

**П-03 «Инженерные системы зданий и сооружений»**

Программа включает учебные разделы:

- *Основы механики жидкости и газа*
- *Инженерное оборудование зданий и сооружений*
- *Проектирование, монтаж и эксплуатация систем вентиляции и кондиционирования*
- *Проектирование, монтаж и эксплуатация систем отопления и теплоснабжения*
- *Проектирование, монтаж и эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения*
- *Автоматизация проектных работ с использованием AutoCAD*
- *Электроснабжение и электрооборудование объектов*

**П-04 «Проектирование и конструирование зданий и сооружений»**

Программа включает учебные разделы:

- *Основы сопротивления материалов и механики стержневых систем*
- *Проектирование и расчет оснований и фундаментов зданий и сооружений*
- *Проектирование и расчет железобетонных конструкций*
- *Проектирование и расчет металлических конструкций*
- *Проектирование зданий и сооружений с использованием AutoCAD*
- *Расчет строительных конструкций с использованием SCAD Office*

**П-05 «Контроль качества строительства»**

Программа включает учебные разделы:

- *Основы строительного дела*
- *Инженерное оборудование зданий и сооружений*
- *Технология и контроль качества строительства*
- *Проектирование и расчет железобетонных конструкций*
- *Проектирование и расчет металлических конструкций*
- *Обследование строительных конструкций зданий и сооружений*
- *Выполнение функций технического заказчика и генерального подрядчика*

По окончании курса слушателю выдается диплом о профессиональной переподготовке  
установленного образца, **дающий право на ведение профессиональной деятельности**

