



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

**№3 (41) 2012**  
**(май-июнь)**

# СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

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

## Редакционный совет:

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

## Главный редактор:

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

## Заместители главного редактора:

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

## Редколлегия:

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

## Ответственный за выпуск:

**Солопов С.В.** к.т.н.

## Адрес редакции:

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

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

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

© ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2012

## Содержание

### **Теория инженерных сооружений.**

#### **Строительные конструкции**

- Авдяков Д.В., Делова М.И.** Влияние длительности нагружения на параметры несущей способности изгибаемых деревянных клееных элементов..... 3
- Карпенко Н.И., Радайкин О.В.** К совершенствованию диаграмм деформирования бетона для определения момента трещинообразования и разрушающего момента в изгибаемых железобетонных элементах..... 10
- Коробко А.В., Прокуров М.Ю., Черняев А.А.** Программа определения максимального прогиба изгибаемых пластинок с использованием отношения конформных радиусов, отображенных на круг областей, ограничивающих их контуры. 17
- Коробко В.И., Савин С.Ю.** Изгиб ортотропных пластинок в виде ромбов с комбинированными граничными условиями..... 25
- Потураева Т.В., Брума Е.В.** Решение дифференциального уравнения с произвольными переменными коэффициентами методом переменной координаты.. 31
- Ставская И.С., Марков С.В., Морозова О.В.** Продольные трещины в защитном слое бетона в условиях коррозионных повреждений..... 35

### **Строительные материалы**

#### **и технологии**

- Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Ширко С.В., Мацаенко А.А.** Техничко-экологическое обоснование получения наномодификатора для бетона..... 42
- Соломенцев А.Б., Баранов И.А.** Оценка параметров микроструктуры добавок для щебеночно-мастичного асфальтобетона с помощью микроскопа Axioskop 2 MAT..... 48
- Федосов С.В., Акулова М.В., Гунина Н.М., Потемкина О.В.** Исследование влияния вида и размера заполнителя на свойства цементного композита..... 59
- Христофоров А.И., Христофорова И.А., Еропов О.Л.** Цементно-песчаная композиция, модифицированная асбестом и тетраэтоксисиланом..... 66
- Щепочкина Ю.А., Баканов М.О.** Технология получения композиционного теплоизоляционного материала с защитно-декоративным покрытием..... 73

Журнал «Строительство и реконструкция» входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора технических наук.



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

**№3 (41) 2012**  
**(May-June)**

# BUILDING AND RECONSTRUCTION

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

## Editorial council:

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

## Editor-in-chief

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

## Editor-in-chief assistants:

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

## Editorial committee

**Bondarenko V.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Gordon V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Karpenko N.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Kljueva N.V.** Doc. Sc. Tech., Assistant Prof.  
**Korobko A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Korol E.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Merkulov C.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Olkov Y.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Rimshin V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Sergeychuk O.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Serpik I.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Tur V.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Turkov A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Fyodorov V.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Chernyshov E.M.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Schach R.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## Responsible for edition:

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

The edition address: 302006, Orel,  
Street Moscow, 77  
+7 (4862) 73-43-49  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: oantc@ostu.ru

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

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

© State University ESPC, 2012

## Contents

### *Theory of engineering structures.*

#### *Building units*

<b>Avdjakov D.M., Delova M.I.</b> Influence of load duration on bearing capacity of glued laminated timber elements under bending.....	3
<b>Karpenko N.I., Radaykin O.V.</b> To improve the stress-strain diagram of concrete to determine the cracking moment and the failure moment in bending reinforced concrete elements.....	10
<b>Korobko A.V., Prokurov M.Yu., Chernyaev A.A.</b> Program of definition maximal deflection of bent plates with use the relations of conformal radiuses displayed on the circle of the areas limiting their contours.....	17
<b>Korobko V.I., Savin S.Ju.</b> Bending of the triangular orthotropic plate with homogeneous and combined boundary conditions.....	25
<b>Poturaeva T.V., Brooma, E.V.</b> Solution of differential equations of arbitrary governmental variable coefficients by variable coordinates.....	31
<b>Stavskaja I.S., Markov S.V., Morozova O.V.</b> Longitudinal cracks in the protective layer of concrete in the conditions of corrosion damages.....	35

#### *Construction materials and technologies*

<b>Lukutcova N.P., Pykin A.A., Shirko S.V., Macaenko A.A.</b> Technical-and-ecology study for concrete nanomodificator production.....	42
<b>Solomencev A.B., Baranov I.A.</b> Parameter estimation of the microstructure of additives for mastic-macadam asphalt concrete, using a microscope Axioskop 2 MAT.....	48
<b>Fedosov S.V., Akulova M.V., Gunina N.M., Potemkina O.V.</b> The investigation of effect of the aggregate type and size on the cement composite's properties.....	59
<b>Khristoforov A.I., Khristoforova I.A., Eropov O.L.</b> The cement-sandy composition modified asbestos and tetraethylorthosilicate.....	66
<b>Shchepochkina J.A., Bacanov M.O.</b> Technology of reception composite heat-insulating material with the protectively-decorative covering.....	73

УДК 624.011:674.028.9

АВДЯКОВ Д.В., ДЕЛОВА М.И.

**ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НАГРУЖЕНИЯ  
НА ПАРАМЕТРЫ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  
ИЗГИБАЕМЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КЛЕЕНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*Приведены исследования влияния фактора времени на несущую способность клееных деревянных элементов при статическом нагружении, работающих в условиях изгиба. Рассматриваются клееные деревянные конструкции как с наличием дефектов и повреждений, так и без них.*

**Ключевые слова:** деревянные клееные конструкции, изгиб, прочность, надежность, долговечность, напряжения, деформации, несущая способность, статическая нагрузка.

Описать параметры прочности, надежности и долговечности клееных деревянных конструкций в течение всего срока службы невозможно без учета реально протекающих в них процессов. Использование в данном случае классической теории прочности возможно только на стадии, когда строительная конструкция представляет собой сплошное твердое тело без значительных дефектов, т.е. на начальной стадии эксплуатации. Затем с течением времени при образовании концентраторов напряжений несущая способность конструкций снижается и в этом случае наиболее целесообразно применение аппарата механики разрушения.

Целью проведенных исследований являлось изучение влияния длительности нагружения на параметры несущей способности изгибаемых деревянных клееных элементов как на начальной стадии эксплуатации, так и на стадии, когда в конструкции уже есть дефекты и повреждения.

Рассматривая строительную конструкцию как сплошное тело, исходя из кинетических представлений, деформирование конструкций можно рассматривать как взаимодействие и взаимовлияние двух конкурирующих процессов: деформационных, связанных с релаксационными процессами, и процессов разрушения, связанных с образованием и развитием трещин от силовых факторов и температурно-влажностных воздействий [1, 2].

Расчет изгибаемых элементов из клееной древесины по второй группе предельных состояний связан с оценкой их прогиба от длительно-действующих нагрузок [3].

На величину прогиба конструкций из клееной древесины влияют следующие основные факторы: схема приложения нагрузок в пролете балки, геометрические параметры балок, длительность приложения нагрузок, сдвиг от поперечной силы.

В существующих нормах проектирования деревянных конструкций [4] прогиб изгибаемых элементов в середине пролета рекомендуется определять по следующей формуле:

$$f = \frac{f_0}{k} \left( 1 + c \frac{h^2}{l^2} \right), \quad (1)$$

где  $f_0$  – прогиб балки постоянного сечения высотой  $h$  без учета деформаций сдвига, мм;  $k$  – коэффициент, учитывающий влияние переменной высоты сечения, принимаемый равным 1 для балок постоянного сечения;  $c$  – коэффициент, учитывающий влияние деформаций сдвига от поперечной силы.

Для балок с постоянной высотой сечения при нагружении двумя сосредоточенными силами коэффициент  $c$  определяется по формуле:

$$c = 48 \cdot \frac{1}{3 - 4\alpha^2}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – расстояние от опоры до места приложения силы в долях от расчетного пролета.

Из приведенной формулы (2) следует, что коэффициент  $c$  формально зависит только от схемы приложения нагрузок. Однако если для определения прогиба при исследованной схеме нагружения в середине пролета использовать формулу Мора [5], то получим следующую зависимость:

$$f_c = \frac{1}{54} \cdot \frac{Fl_p^3}{E_x J} \cdot \left(1 + 0,957 \cdot \frac{E_x}{G_{xy}} \cdot \frac{h^2}{l_p^2}\right), \quad (3)$$

которая явно указывает, что дополнительный прогиб от деформаций сдвига зависит от отношения как геометрических ( $h/l_p$ ), так и физико-механических параметров ( $E_x/G_{xy}$ ).

Проведенные длительные испытания для балок двух серий КДБ1-Д<sub>i</sub> ( $l_p/h=7,5$ ) и КДБ2-Д<sub>i</sub> ( $l_p/h=16$ ) (рис. 1) при условных напряжениях [5]  $\sigma_{yc}=5,0$  МПа;  $\sigma_{yc}=10,0$  МПа;  $\sigma_{yc}=15,0$  МПа показали, что в процессе испытаний происходит как увеличение прогиба элементов, так и деформаций в их сечениях. За полное время работы балки под нагрузкой при проведении длительных испытаний было принято время до полного затухания деформаций ползучести. Начальные прогибы балок с  $l_p/h=7,5$  увеличились в 1,1 раза (при  $\sigma_{yc}=5,0$  МПа); в 1,18 (при  $\sigma_{yc}=10,0$  МПа) и в 1,22 (при  $\sigma_{yc}=15,0$  МПа), а в балках с  $l_p/h=16$  – в 1,16; 1,30; 1,37 соответственно.

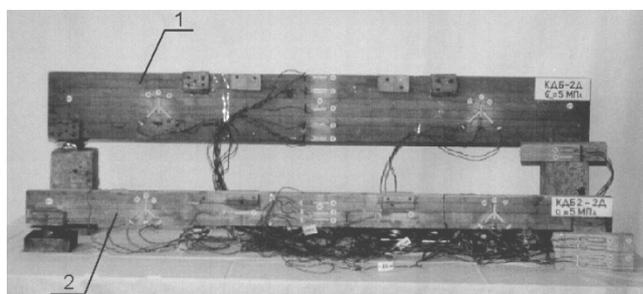


Рисунок 1 – Испытываемые балки: 1 – балка серии КДБ1-Д; 2 – балка серии КДБ2-Д

Увеличение деформативности балок связано с изменением модулей упругости и сдвига. Поэтому необходимо в формуле (3) принимать эти величины с учетом снижения их во времени. При этом, как было показано проведенными экспериментальными исследованиями (табл. 1), снижение модуля упругости и модуля сдвига при длительном нагружении происходит непропорционально, т.е. отношение  $E_x^k / G_{xy}^k \neq E_x^{\partial l} / G_{xy}^{\partial l}$  (здесь  $E_x^k$  и  $E_x^{\partial l}$  – кратковременный и длительный модули упругости соответственно;  $G_{xy}^k$  и  $G_{xy}^{\partial l}$  – кратковременный и длительный модули сдвига соответственно). Известно также [6], что отношение модуля упругости  $E_x$  к модулю сдвига  $G_{xy}$  зависит от качества древесины пиломатериала. С повышением качества древесины (класса прочности) увеличивается отношение  $E_x/G_{xy}$  от 17 до 24 [6]. В существующих нормах проектирования [4] отношение  $E_x/G_{xy}$ , которое формально отражает коэффициент  $c$  в формуле (1), принято равным 20 и не учитывает как класс пиломатериала по прочности, так и снижение отношения  $E_x/G_{xy}$  во времени.

Характер изменения деформаций в середине пролета при длительном действии нагрузок показывает, что в растянутой зоне они увеличились в большей степени, чем в сжатой.

На основании вышеизложенного для определения максимального прогиба изгибаемого элемента предлагается следующая формула:

$$f_c = \frac{F \cdot x \left( \frac{3l_p^2}{P} - 4x^2 \right)}{48 E_x \cdot J \cdot n_E} \cdot \left[ 1 + 2,4n^{-1} \frac{E_x}{G_{xy}} \left( \frac{E_x}{G_{xy}} \right) \frac{h^2}{3l_p^2 - 4x^2} \right], \quad (4)$$

где  $f_c$  – прогиб элемента в середине пролета, мм;  $E_x$  – кратковременный модуль упругости, МПа;  $G_{xy}$  – кратковременный модуль сдвига, МПа;  $J$  – момент инерции сечения, м<sup>3</sup>;  $h$  – высота

сечения, м;  $l_p$  – расчетный пролет, м;  $x$  – расстояние от опоры до места приложения сосредоточенных нагрузок, м;  $n_E$  – коэффициент, учитывающий снижение модуля упругости при длительном нагружении;  $n_E/G$  – коэффициент, учитывающий снижение отношения  $E_x/G_{xy}$  при длительном нагружении.

Коэффициенты  $n_E$  и  $n_E/G$  необходимо принимать по графикам (рис. 2 и 3) в зависимости от уровня действующих напряжений.

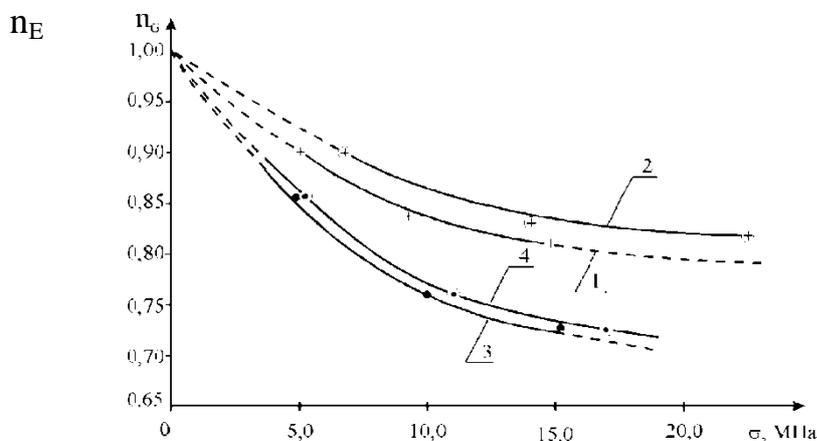


Рисунок 2 – Снижение отношения  $E_x^k / E_x^n$  при длительном действии нагрузки  
 1, 2 – для балок с отношением  $l_p/h=7,5$ ; 3, 4 – для балок с отношением  $l_p/h=16$ ;  
 ⊕, ⊙ – при  $\sigma$  действительном; ●, + – при  $\sigma$  условном

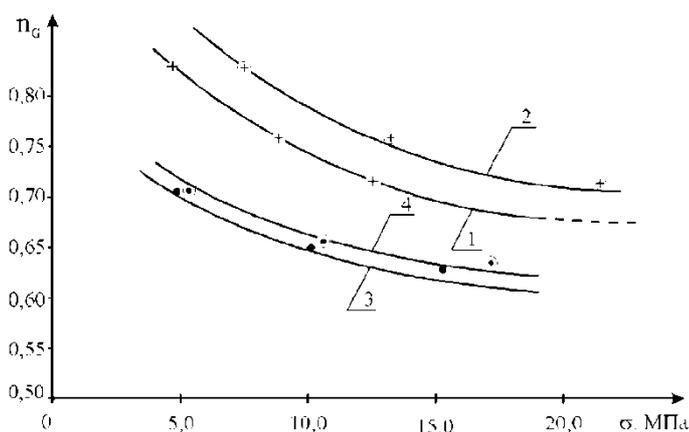


Рисунок 3 – Снижение отношения  $E_x/G_{xy}$  при длительном действии нагрузки  
 (обозначения те же, что и на рисунке 2)

Прогибы элементов не должны превышать предельных величин. Это условие записывается в следующем виде:

$$f/l_p \leq \left[ f/l_p \right], \quad (5)$$

где  $f/l_p$  – относительный прогиб конструкции;  $\left[ f/l_p \right]$  – предельный относительный прогиб.

Величины относительных предельных прогибов и их изменение во времени в зависимости от отношения  $l_p/h$  и уровня действующих напряжений приведены в таблице 1.

Расхождение величин относительных прогибов, полученных экспериментально, с теоретическими значениями, вычисленными по формуле (4), составляет не более 15%. Подобное расхождение можно отнести к удовлетворительному, учитывая значительный разброс результатов при механических испытаниях элементов деревянных конструкций. Поэтому для определения прогибов при длительном действии нагрузок с достаточной для практических целей точностью можно использовать формулу (4).

Таблица 1 – Относительные предельные прогибы элементов при кратковременном и длительном нагружениях

$l_p/h$	$\sigma_{yc}$	Относительные прогибы элементов			
		кратковременные		длительные	
		экспериментальные	по формуле (4)	экспериментальные	по формуле (4)
7,5	5,0	$\frac{1}{1250}$	$\frac{1}{923}$	$\frac{1}{1463}$	$\frac{1}{1481}$
	10,0	$\frac{1}{625}$	$\frac{1}{462}$	$\frac{1}{496}$	$\frac{1}{456}$
	15,0	$\frac{1}{416}$	$\frac{1}{308}$	$\frac{1}{291}$	$\frac{1}{315}$
16,0	5,0	$\frac{1}{710}$	$\frac{1}{571}$	$\frac{1}{632}$	$\frac{1}{667}$
	10,0	$\frac{1}{355}$	$\frac{1}{293}$	$\frac{1}{338}$	$\frac{1}{358}$
	15,0	$\frac{1}{237}$	$\frac{1}{194}$	$\frac{1}{164}$	$\frac{1}{143}$

Анализ экспериментальных результатов (табл. 1) показывает, что для конструкций с отношением  $l_p/h \leq 7,5$  при их расчете по второй группе предельных состояний необходимо более строго подходить к нормированию предельного относительного прогиба. Для конструкций с отношением  $l_p/h \geq 12$  определяющим может стать расчет по предельным состояниям второй группы.

Для практических расчетов конструкций из клееной древесины по второй группе предельных состояний можно регламентировать следующее:

- для элементов с отношением  $l_p/h \leq 7,5$  предельный относительный прогиб не должен превышать  $1/300$  пролета;
- для элементов с отношением  $l_p/h \geq 12$  предельный относительный прогиб не должен превышать  $1/240$  пролета.

С целью определения влияния фактора времени на несущую способность изгибаемых клееных деревянных элементов с дефектами и повреждениями в виде трещины в растянутой зоне в середине пролета были испытаны балочные образцы с четырехточечной схемой нагружения (в четвертях пролета) и иницированной трещиной в растянутой зоне. Геометрические размеры принимались следующими: толщина  $t = 40$  мм, пролет  $L = 450$  мм, высота  $h = 45$  мм, глубина искусственной трещины  $a = 5$  мм ( $a/h = 0,11$ ) (рис. 4). При этом были выбраны уровни нагружения 0,9; 0,8; 0,7 от критического значения коэффициента интенсивности напряжений, полученного ранее экспериментально [7] ( $K_{IC} = 118$  кПа·м<sup>1/2</sup>). Влажность образцов составляла 12...14%.

Вычисление критического КИН производили по формуле:

$$K_{IC} = \frac{M}{t(h-a)^3} \sqrt{\frac{6(h-a)^3 a^3}{(h-a)^3 + a^3}}, \quad (6)$$

где  $M$  – изгибающий момент, возникающий в вершине трещины от действия нагрузки  $P_c$ ;  $t$  – толщина образца;  $h$  – высота образца;  $a$  – глубина иницированной трещины [8].

На рисунке 5 показан общий вид установки. Нагрузка на образцы передавалась также, как и при кратковременных статических испытаниях.

По результатам испытаний был зафиксирован безостановочный рост трещины при уровне  $0,9K_{IC}$ , вследствие чего все образцы теряли несущую способность, не успев даже воспринять заданную нагрузку полностью. Видимо, это связано с широким диапазоном вариации параметров трещиностойкости древесины, так как данный материал обладает высокой неоднородностью.

В таблице 2 представлены результаты испытаний БОТП-образцов на длительную трещиностойкость при уровнях нагружения  $0,8K_{IC}$  и  $0,7K_{IC}$ .

При уровне нагружения  $0,8K_{IC}$  рост трещины был зафиксирован в среднем через 2,5 ча-

са ( $\gamma = 26\%$ ); а при уровне нагружения  $0,7K_{IC}$  – через 7,9 суток ( $\gamma = 20,1\%$ ). Прогиб в середине пролета образцов, при котором появлялись трещины при всех уровнях нагружения, в среднем составил  $\delta = 1/201L$  ( $\gamma = 15\%$ ). При длительном нагружении образцы разрушались по схеме, аналогичной схеме разрушения при кратковременной нагрузке.

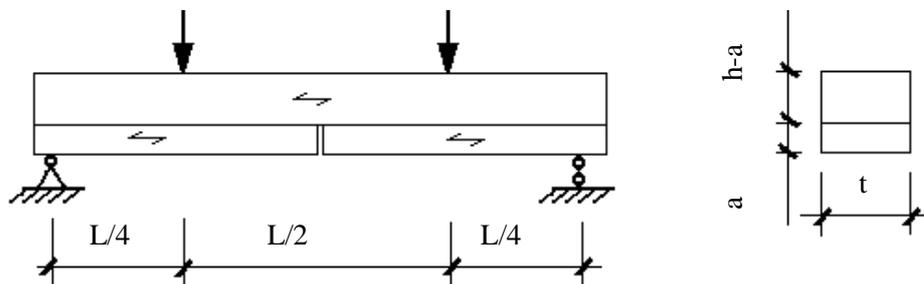


Рисунок 4 – Схема балочного образца для длительных испытаний

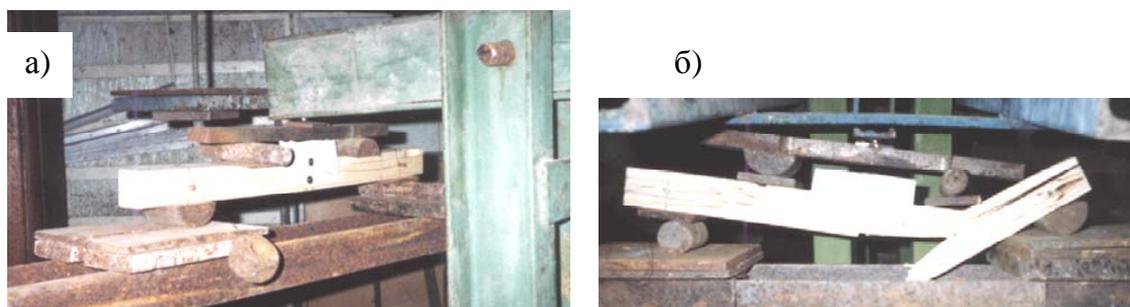


Рисунок 5 – Длительные испытания образцов: а – до нагружения; б – после нагружения

Таблица 2 – Результаты испытаний БОТП-образцов на длительную трещиностойкость

Марка образца	Уровень нагружения	$t$ (сут.)	$t_{срзн}$ (сут.)	$\sigma_t$ (сут.)	$v_t$ %	Критический прогиб $\delta$	$\delta_{срзн}$	$\sigma_{\delta} \times 10^{-4}$	$v_{\delta}$
БКД-2s	$0,8K_{IC}$	0,073	0,1	0,03	26	$1/197L$	$1/201L$	$7,15L$	15
БКД-3s		0,14				$1/261L$			
БКД-4s		0,1				$1/165L$			
БКД-1s	$0,7K_{IC}$	6,4	7,9	1,59	20	$1/181L$	$1/201L$	$7,15L$	15
БКД-6s		10,1				$1/242L$			
БКД-7s		7,2				$1/194L$			

С целью выявления кинетики роста трещин в изделиях и конструкциях из клееной древесины при изгибе были проведены испытания крупноразмерного образца длиной  $L = 2500$  мм, высотой  $h = 134$  мм, толщиной  $t = 130$  мм и длиной инициированной трещины в растянутой зоне в середине пролета  $a = 18$  мм ( $a/h = 0,11$ ). Схема нагружения и траектории роста магистральных трещин в образце показаны на рисунке 6. Балка была изготовлена из того же материала, что и малые образцы.

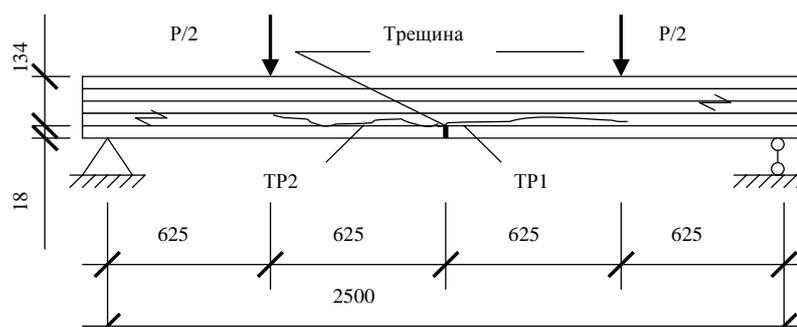


Рисунок 6 – Схема испытаний и разрушения крупноразмерного деревянного клееного элемента при длительном нагружении

Появление магистральных трещин TP1 и TP2 было зафиксировано при нагрузке 27,4 кН, соответствующей в данном случае критическому значению коэффициента интенсивности напряжений  $K_{IC} = 161,73 \text{ кПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  при прогибе в середине пролета  $\delta = 1/145L$ . После увеличения нагрузки до  $1,235K_{IC} = 200 \text{ кПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  крупноразмерный образец потерял несущую способность через 99,6 суток вследствие того, что трещина TP1, двигаясь вдоль волокон, прошла зону чистого изгиба и устремилась вверх к точкам приложения нагрузки, разрывая волокна древесины. Критический прогиб балки в середине пролета при этом составил  $\delta = 1/73L$ .

Как показал анализ результатов, магистральные трещины в крупноразмерном БОП-образце прорастали не монотонно, а скачкообразно, что, очевидно, объясняется существованием некоторого критического значения ширины раскрытия трещины, зависящего от характеристик материала и длины трещины, при достижении которого происходит страгивание.

Анализ строения слоя древесины, где прорастали трещины, показал, что угол наклона волокон по отношению к клеевому шву в среднем составил  $5^\circ$  (рис. 7). По этой причине трещина TP2 двигалась по клеевому шву и имела ширину раскрытия в среднем в 2,6 раза больше, чем трещина TP1, двигавшаяся по цельной древесине (табл. 3). Вследствие этого скорость роста TP1 оказалось выше скорости роста TP2, а следовательно причиной разрушения элемента стало именно эта трещина.

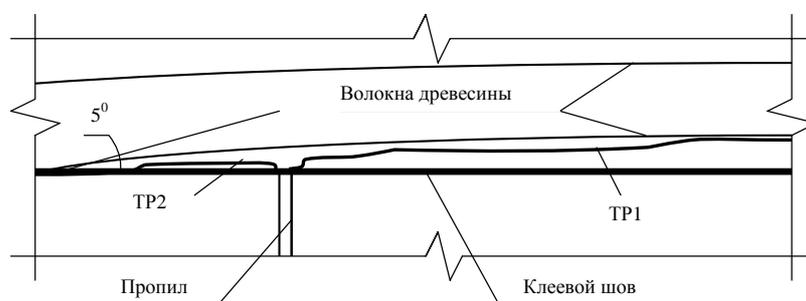


Рисунок 7 – Схема расположения волокон и траектории роста трещин в крупноразмерном БОП-образце при длительной статической нагрузке

Таблица 3 – Статистические характеристики изменения отношения ширины трещины TP2 к ширине трещины TP1 при одинаковой длине

Длина трещин, (мм)	Ширина TP2, (мм)	Ширина TP1, (мм)	Отношение ширины TP2 к ширине TP1	Среднее значение	$\sigma$	$v, \%$
126	0,640	0,240	2,667	2,636	0,222	8,42
208	0,930	0,368	2,527			
212	0,930	0,395	2,354			
214	0,970	0,409	2,372			
222	1,270	0,470	2,702			
223	1,350	0,480	2,813			
225	1,510	0,500	3,020			

Таким образом, анализируя полученные результаты, можно заключить, что время до разрушения образца находится в зависимости от уровня нагружения, а именно уменьшается при увеличении последнего. Следовательно существует такой уровень нагружения, при котором влияние фактора времени на трещиностойкость изделий и конструкций из клееной древесины будет настолько мало, что им можно будет пренебречь.

Следует отметить, что исследования, проведенные в данной работе, по определению влияния длительности статического нагружения на параметры несущей способности изгибаемых конструкций из клееной древесины имели поисковый характер, а методика проведения эксперимента требует дальнейшей доработки и дополнения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

2. Петров, В.А. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов [Текст] / В.А. Петров, А.Я. Башкарев, В.И. Веттерген. – С. Пб.: Политехника, 1993. – 475 с.
3. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия (актуализация СНиП 2.01.07-85) [Текст]. – М.: Госстрой, 2011. – 46 с.
4. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции. Нормы проектирования [Текст]. – М.: Стройиздат, 1982. – 65 с.
5. Тимошенко, С.П. Механика материалов [Текст] / С.П. Тимошенко, Дж. Гере. – М.: Мир, 1976. – 670 с.
6. Поветкин, С.В. Выносливость клееных деревянных элементов при изгибе [Текст]: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Воронеж: ВИСИ, 1988. – 21 с.
7. Коробко, В.И. Контроль стойкости конструкций из композиционных материалов к трещинообразованию [Текст] / В.И. Коробко, Д.В. Авдяков // Сб. трудов международной научно-технической конференции «Приборостроение 2005. – Винница-Ялта – 2005. – С. 147-153.
8. Smith, T.W. Fracture mechanics analysis of butt joints in laminated wood beams [Text] / T.W. Smith, D.T. Penney // Wood Sci. – 1980. – №12(4) – P. 227-235.

**Авдяков Дмитрий Владимирович**

Курский государственный университет, г. Курск

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

Тел.: +7 (4712) 34-27-14

**Делова Маргарита Ивановна**

Курский государственный университет, г. Курск

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

---

D.M. AVDJAKOV, M.I. DELOVA

## INFLUENCE OF LOAD DURATION ON BEARING CAPACITY OF GLUED LAMINATED TIMBER ELEMENTS UNDER BENDING

*Researches of influence of a factor of time for bearing ability of kleyony wooden elements are given at the static loading, working in the conditions of a bend. Kleeny wooden designs both with existence of defects and damages, and without them are considered.*

**Keywords:** wood glue constructions, bend, durability, reliability, durability, tension, the deformations, bearing ability, static loading.

### BIBLIOGRAPHY

1. Regel', V.R. Kineticheskaja priroda prochnosti tverdyh tel [Tekst] / V.R. Regel', A.I. Slucker, Je.E. Tomashevskij. – М.: Nauka, 1974. – 560 с.
2. Petrov, V.A. Fizicheskie osnovy prognozirovanija dolgovechnosti konstrukcionnyh materialov [Tekst] / V.A. Petrov, A.Ja. Bashkarev, V.I. Vettergen'. – S. Pб.: Politehnika, 1993. – 475 с.
3. SP 20.13330.2011 Nagruzki i vozdejstvija (aktualizacija SNiP 2.01.07-85) [Tekst]. – М.: Gosstroj, 2011. – 46 с.
4. SNiP II-25-80. Derevjannye konstrukcii. Normy proektirovanija [Tekst]. – М.: Strojizdat, 1982. – 65 с.
5. Timoshenko, S.P. Mehanika materialov [Tekst] / S.P. Timoshenko, Dzh. Gere. – М.: Mir, 1976. – 670 с.
6. Povetkin, S.V. Vynoslivost' klejonyh derevjannyh jelementov pri izgibe [Tekst]: Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.23.01. – Voronezh: VISI, 1988. – 21 с.
7. Korobko, V.I. Kontrol' stojkosti konstrukcij iz kompazicionnyh materialov k trevinoobrazovaniju [Tekst] / V.I. Korobko, D.V. Avdjakov // Sb. trudov mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Priborostroenie 2005. – Vinnica-Jalta – 2005. – S. 147-153.
8. Smith, T.W. Fracture mechanics analysis of butt joints in laminated wood beams [Text] / T.W. Smith, D.T. Penney // Wood Sci. – 1980. – №12(4) – R. 227-235.

**Avdjakov Dmitrij Vladimirovich**

Kursk state university, Kursk

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

Ph.: +7 (4712) 34-27-14

**Delova Margarita Ivanovna**

Kursk state university, Kursk

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

УДК 624.012.4-183.2, 624.044:539.384

КАРПЕНКО Н.И., РАДАЙКИН О.В.

## К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И РАЗРУШАЮЩЕГО МОМЕНТА В ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

*Целью проведенных исследований ставилось совершенствование разработанных Н.И. Карпенко теоретических диаграмм деформирования бетона при растяжении и сжатии для определения момента трещинообразования и разрушающего момента в изгибаемых железобетонных элементах. Для этого в выражениях, описывающих диаграммы, подобраны корректирующие коэффициенты, значение которых рекомендуется использовать в диаграммной методике расчета. В качестве «эталона» сравнения в работе принята методика расчета по методу предельных состояний СНиП 2.03.01-84\*, основанная на работах А.А. Гвоздева, С.А. Дмитриева. Установлена удовлетворительная сходимость полученных результатов.*

**Ключевые слова:** *изгибаемый элемент, железобетон, жесткость, диаграмма деформирования, диаграммный метод, методика расчета.*

Благодаря быстрому развитию вычислительной техники стало возможным широкое внедрение в инженерную практику проектирования железобетонных конструкций так называемых диаграммных методов расчета (в том числе вошедших в последние СП и СНиП), хотя современная диаграммная модель стержневого элемента и ее физические соотношения были разработаны в работе [4] еще в 80-х годах прошлого столетия. В работе [5] эта модель развита применительно к расчету стержневых конструкций в приращениях. При выводе физических соотношений диаграммной модели используются: гипотеза плоских сечений (в элементах с трещинами в трактовке В.И. Мурашова, усовершенствованная А.А. Гвоздевым, применительно к средним деформациям арматуры и бетона на участке между трещинами), численное интегрирование напряжений по сечению путем разделения сечения на плоскости (рис. 1) или, в общем виде, на малые квадратные или треугольные элементы, в пределах которых напряжения осредняются, и диаграмм деформирования бетона и арматуры, которые в диаграммной модели играют ключевую роль.

Один из возможных видов теоретических диаграмм состояния бетона предложен в работе [2] и развит в монографии [3] (рис. 2).

В связи с вышеизложенным целью статьи является совершенствование представленных диаграмм для определения момента трещинообразования и разрушающего момента в изгибаемых железобетонных элементах.

Отметим, что сами по себе диаграммные методы имеют ясный и понятный алгоритм, однако, требующий автоматизации расчетов на ЭВМ из-за большого объема вычислений с множеством итераций. Поэтому основной задачей данной работы служит подбор расчетных коэффициентов, задающих форму теоретических диаграмм деформирования бетона [2], [3] в зависимости от его класса по прочности и процента армирования. Для решения этой научной задачи нами использовался стандартный программный комплекс *NormCad* с возможностью самостоятельного программирования формы диаграмм пользователем.

В качестве основы для проверки диаграммы растяжения бетона при изгибе было принято условие, чтобы момент трещинообразования, вычисленный по рассматриваемой диаграммной методике, практически совпадал с моментом трещинообразования, который определялся по методике Гвоздева А.А., Дмитриева С.А. [1]. Как известно эта методика прошла более чем 30-летнюю экспериментальную проверку и более 40 лет входила в СНиПы, вплоть до СНиП 2.03.01.84\* [6]. Согласно ей момент трещинообразования определяется по следующим формулам:

- для неармированных бетонных элементов:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} \frac{bh^2}{3,5}, \quad (1)$$

где  $R_{bt,ser}$  – нормативный предел прочности бетона на растяжение,  $b, h$  – размеры поперечного сечения элемента;

- для железобетонных элементов:

$$M_{crc} = \gamma R_{bt,ser} W_{red}, \quad (2)$$

где  $W_{red}$  – приведенный момент сопротивления железобетонного сечения,  $\gamma=1,75$  – коэффициент, учитывающий пластические деформации и форму сечения элемента.

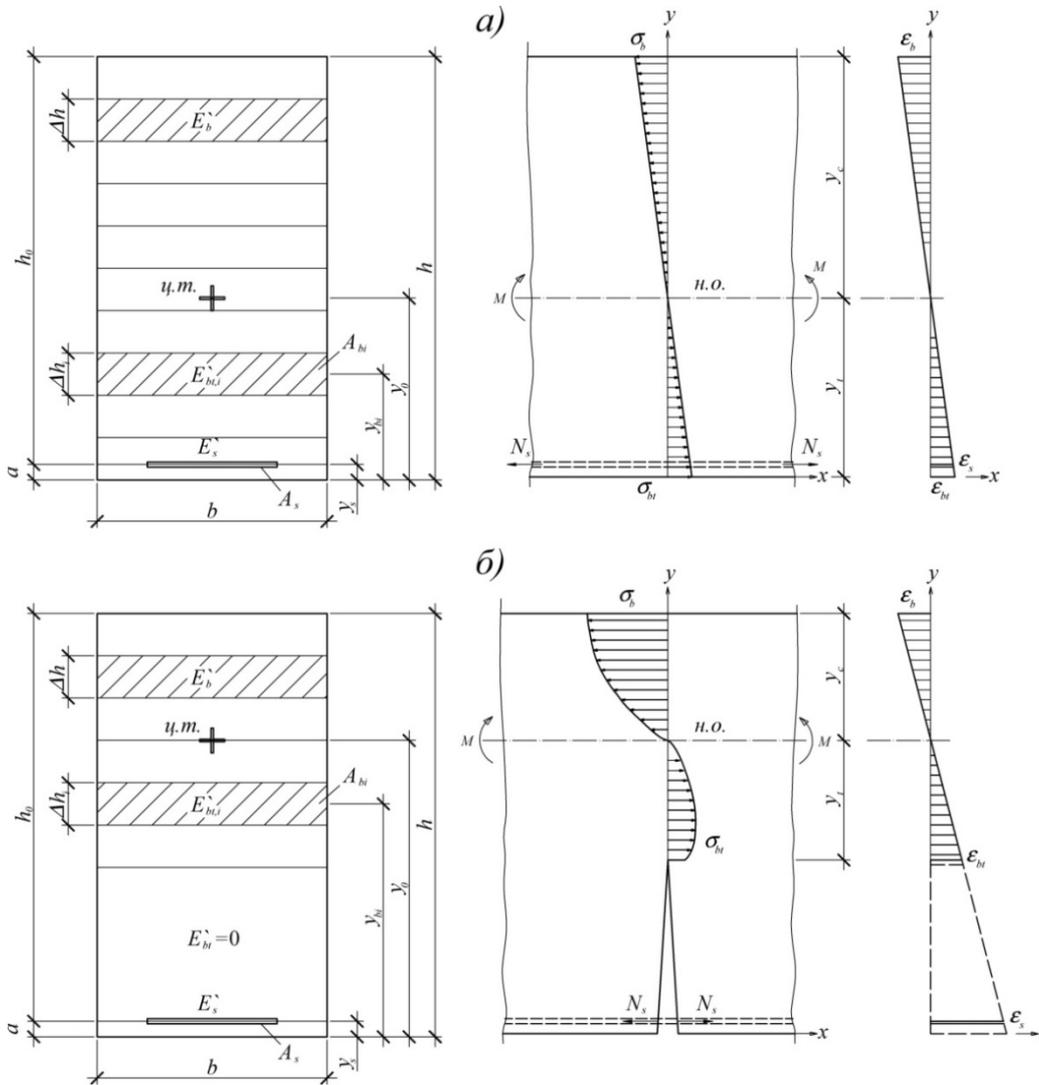


Рисунок 1 – Расчетная схема нормального сечения изгибаемого железобетонного элемента до (а) и после (б) образования трещины

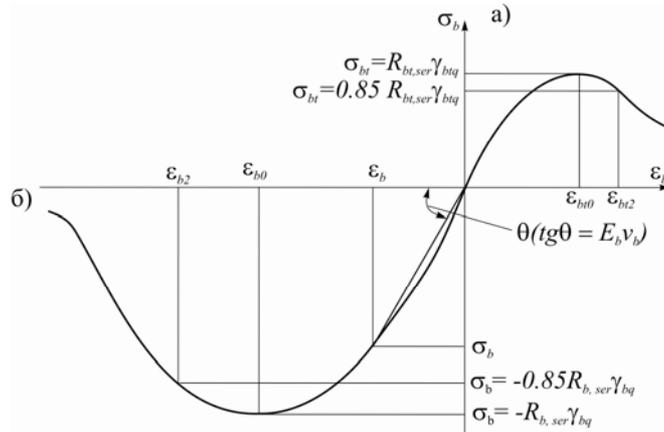


Рисунок 2 – Диаграммы деформирования бетона при растяжении (а) и при сжатии (б)

Проверкой диаграммы сжатия послужило условие равенства разрушающих моментов, определяемых по методике [2]-[3] и по [6]:

$$M_{ult} = R_b b x (h_0 - 0,5x), \tag{3}$$

где  $R_b$  – расчетный предел прочности бетона на сжатие;  $h_0$  – рабочая высота сечения;  $x$  – высота сжатой зоны бетона.

В методике [2]-[3] аналитическая зависимость для описания диаграммы растяжения бетона « $\epsilon_{bt}-\sigma_{bt}$ » (рис. 2, а) принимается в виде:

$$\epsilon_{bt} = \frac{\sigma_{bt}}{E_b \nu_{bt}}, \tag{4}$$

где  $\nu_{bt}$  – коэффициент изменения секущего модуля, который вычисляется по формуле:

$$\nu_{bt} = \bar{\nu}_{bt} \pm (\nu_0 - \bar{\nu}_{bt}) \sqrt{1 - \omega \eta - (1 - \omega) \eta^2}, \tag{5}$$

где  $\eta = \sigma_{bt} / (R_{bt,ser})$  – текущий уровень напряжений в бетоне;  $\bar{\nu}_b \geq 0$  – коэффициент изменения секущего модуля в вершине диаграммы:

$$\bar{\nu}_{bt} = \left( a + 0,15 \frac{R_{btm}}{R_{0tm}} \right), a=0,6, R_{0tm}=2,5 \text{ МПа}, \tag{6}$$

$\omega$  – коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы:

- для восходящей ветви диаграммы  $\nu_0=1,0$ .

$$\omega = 2 - 2,5 \bar{\nu}_{bt}. \tag{7}$$

- для нисходящей ветви диаграммы  $\nu_0 = 2,05 \bar{\nu}_b$ .

$$\omega = 1,95 \bar{\nu}_{bt} - 0,138. \tag{8}$$

Аналитическая зависимость описания диаграммы сжатия бетона « $\epsilon_b-\sigma_b$ » (рис. 2, б) принимается в виде формул (4), (5), где  $\epsilon_{bt}$ ,  $\sigma_{bt}$ ,  $\nu_{bt}$ ,  $\bar{\nu}_{bt}$  заменяются соответственно на  $\epsilon_b$ ,  $\sigma_b$ ,  $\nu_b$ ,  $\bar{\nu}_b$ ;  $\eta = -\sigma_b / R_{b,n} \geq 0$ , причем:

$$\bar{\nu}_b = - \frac{R_{b,n}}{\epsilon_{b0} E_b}, \tag{9}$$

где  $\epsilon_{b0}$  – деформация бетона в вершине диаграммы.

Условием образования трещины в сечении принято равенство деформаций растянутой грани бетона величине:

$$\epsilon_{bt2} = \frac{0,85 R_{bt,ser}}{E_b \nu_{bt} (0,85)}. \tag{10}$$

Разрушающий изгибающий момент элемента определялся, когда выполнялось хотя бы одно из двух условий:

$$\epsilon_{b,max} = \epsilon_{b2}, \quad \epsilon_s = \epsilon_{s2}, \tag{11}$$

где  $\varepsilon_{b,max}$ ,  $\varepsilon_{b2}$  – соответственно текущие деформации сжатой грани бетона и ее деформации в конце ниспадающей ветви диаграммы:  $\varepsilon_{b2} = \frac{0,85R_b}{E_b \nu_b (0,85)}$ ;  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_{s0}$  – соответственно текущие деформации арматуры и ее деформации, удовлетворяющие равенству возникающих в ней напряжений  $\sigma_s$  величине  $1,1R_s$ . При этом связь между напряжениями и деформациями в арматурных стержнях принималась по методике [3].

По приведенным выше формулам был выполнен расчет момента трещинообразования и разрушающего момента рассмотренного на рисунке 1 элемента. При этом варьировались класс бетона В (В10÷В100) и процент армирования  $\mu$  (0÷3,08%). Принятая арматура класса А400. Рассматривалось только непродолжительное действие нагрузки.

Анализ полученных результатов показал, что для их наилучшего совпадения с формулами (1), (2) в выражения (6), (8) для диаграммы растяжения необходимо ввести следующие корректирующие коэффициенты:

$$\bar{\nu}_{bt} = \left( a + 0,15k \frac{R_{btm}}{R_{0n}} \right) \frac{1}{k},$$

(12)

где  $a$  – коэффициент, принимаемый  $a=0,4$  – для неармированных сечений,  $a=0,6$  – для железобетонных сечений;  $k$  – коэффициент, равный для нормативной диаграммы 1,0, для расчетной –  $k = \frac{R_{bt,ser}}{R_{bt}}$ ;

$$\omega = 0,5\beta_t \bar{\nu}_t - 0,14, \tag{13}$$

где  $\beta_t$  – коэффициент, равный для нормативной диаграммы  $\beta_t = 1,0$ , а для расчетной  $\beta_t = 1 + 0,29 \left( \frac{B}{100} \right)$  – если  $a=0,4$ , и  $\beta_t = 1,5 + 0,5 \left( \frac{B}{100} \right)$  – если  $a=0,6$ .

Для сближения результатов численного определения разрушающего момента с формулой (3) зависимость (8) должна принять вид:

$$\omega = 3,5\beta_c \bar{\nu}_b^2 - 0,14, \tag{14}$$

где  $\beta_c$  – коэффициент, равный для нормативной диаграммы  $\beta_c = 1,0$ , а для расчетной

$$\beta_c = 0,775 + 3,7 \left( \frac{B}{100} \right) - 22,5 \left( \frac{B}{100} \right)^2.$$

Коэффициенты  $\beta_c$  и  $\beta_t$  в формулах (13) и (14) подбирались из условия равенства расчетных и нормативных деформаций в вершине диаграммы и в конце ее ниспадающей ветви.

Отметим, что в качестве основы для определения деформаций бетона в вершине диаграммы сжатия вначале была принята формула Серых Р.Л.:

$$\varepsilon_{b0} = - \frac{B}{E_b} \lambda \frac{1 + 0,75\lambda B / 60 + 0,2\lambda / B}{0,12 + B / 60 + 0,2\lambda / B}, \tag{15}$$

которая приводила к погрешностям для высокопрочного бетона (при  $B > B60$ ). В связи с этим эта формула была откорректирована и приведена к виду:

$$\varepsilon_{b0} = - \frac{B}{E_b} \lambda \frac{1 + \left( 0,8 - 0,15 \frac{B^2}{10000} \right) \frac{\lambda B}{60} + 0,2 \frac{\lambda}{B}}{0,12 + 1,03 \frac{B}{60} + \frac{0,2}{B}}. \tag{16}$$

Здесь  $\lambda$  – безразмерный коэффициент, зависящий от вида бетона и принимаемый равным для тяжелого и мелкозернистого бетона  $\lambda=1$ .

Наряду с этим оказалось возможным использовать для тяжелых бетонов более простые зависимости [5].

$$\varepsilon_{b0} = -200 \cdot 10^{-5} \sqrt[6]{R_{bn}/R_0} \quad (17)$$

или

$$\varepsilon_{b0} = -200 \cdot 10^{-5} \sqrt[6]{B/B_0}, \quad (18)$$

где  $R_0=20$  МПа,  $B_0=28$  МПа.

В таблицах 1.1, 1.2, 2.1, 2.2 представлено сопоставление результатов расчета по предложенным зависимостям и по СНиП [6]. При определении момента трещинообразования наблюдается хорошая сходимост ь данных для обычных процентов армирования при условии, что высота сжатой зоны бетона из расчета арматуры по I-й группе предельных состояний меньше предельной величины:  $\xi \leq \xi_R$ . Начиная с бетона В25, расхождение не превышает 15,4% и с увеличением класса бетона – снижается. Причем с ростом процента армирования это расхождение несколько увеличивается до допустимой в практических расчетах границы. При вычислении разрушающего момента для железобетонных сечений, в которых  $\xi \leq \xi_R$ , существенных расхождений с [6] не наблюдается.

Таблица 1 – Сопоставление  $M_{cr}$  по различным методикам для бетона классов В10, В25 и В45

Параметр	Методика	Класс бетона											
		В10				В25				В45			
		Процент армирования				Процент армирования				Процент армирования			
Неарм.	$\mu=0,63\%$ $\xi=0,69\xi_R$	$\mu=2,31\%$ $\xi=2,51\xi_R$	$\mu=3,08\%$ $\xi=3,34\xi_R$	Неарм.	$\mu=0,63\%$ $\xi=0,28\xi_R$	$\mu=2,31\%$ $\xi=\xi_R$	$\mu=3,08\%$ $\xi=1,2\xi_R$	Неарм.	$\mu=0,63\%$ $\xi=0,12\xi_R$	$\mu=2,31\%$ $\xi=0,44\xi_R$	$\mu=3,08\%$ $\xi=0,58\xi_R$		
$M_{cr}$ , кН·м	1	7,771	9,608	13,848	15,723	14,629	16,833	21,713	23,906	20,114	22,653	28,125	30,539
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	8,072	12,736	23,913	28,533	15,035	19,907	32,047	37,357	-	-	-	-
		1,038*	1,326	1,727	1,815	1,028	1,183	1,476	1,563	-	-	-	-
	3	7,342	10,359	17,689	20,833	13,646	16,876	25,055	28,648	-	22,748	30,666	34,565
		0,945*	1,078	1,277	1,325	0,933	1,003	1,154	1,198	-	1,004	1,090	1,132

Таблица 1.2 – Сопоставление  $M_{cr}$  по различным методикам для бетона классов В60, В80 и В100

Параметр	Методика	Класс бетона											
		В60				В80				В100			
		Процент армирования				Процент армирования				Процент армирования			
Неарм.	$\mu=0,63\%$ $\xi=0,69\xi_R$	$\mu=2,31\%$ $\xi=2,51\xi_R$	$\mu=3,08\%$ $\xi=3,34\xi_R$	Неарм.	$\mu=0,63\%$ $\xi=0,28\xi_R$	$\mu=2,31\%$ $\xi=\xi_R$	$\mu=3,08\%$ $\xi=1,2\xi_R$	Неарм.	$\mu=0,63\%$ $\xi=0,12\xi_R$	$\mu=2,31\%$ $\xi=0,44\xi_R$	$\mu=3,08\%$ $\xi=0,58\xi_R$		
$M_{cr}$ , кН·м	1	23,771	26,529	32,377	35,022	21,854	29,418	35,506	38,261	29,257	32,376	38,877	41,820
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	21,776	25,263	34,243	38,275	-	28,515	36,789	40,883	-	31,038	39,644	43,906
		0,916*	0,952	1,058	1,093	-	0,969	1,036	1,068	-	0,959	1,020	1,050

**Примечание:** 1 – [1] и [6]; 2 – по предложенным формулам,  $a = 0,4$ , 3 – то же при  $a = 0,6$  (см. ф. (12)).

\* в данной строке приведено отношение момента, полученного по сравниваемой методике, к значению по СНиП [6].

Таблица 2.1 – Сопоставление  $M_{ult}$  по различным методикам для бетона классов В10, В25 и В45

Параметр	Методика	Класс бетона											
		В10				В25				В45			
		Процент армирования				Процент армирования				Процент армирования			
Неарм.	$\mu=0,63\%$ $\xi=0,69\xi_R$	$\mu=2,31\%$ $\xi=2,51\xi_R$	$\mu=3,08\%$ $\xi=3,34\xi_R$	Неарм.	$\mu=0,63\%$ $\xi=0,28\xi_R$	$\mu=2,31\%$ $\xi=\xi_R$	$\mu=3,08\%$ $\xi=1,2\xi_R$	Неарм.	$\mu=0,63\%$ $\xi=0,12\xi_R$	$\mu=2,31\%$ $\xi=0,44\xi_R$	$\mu=3,08\%$ $\xi=0,58\xi_R$		
$M_{ult}$	1	7,771	54,151	-	-	14,629	62,124	171,771	196,074	20,114	64,488	202,912	251,436

## Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

кН·м		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	8,072	53,875	73,065	74,840	15,035	62,265	157,05	163,555	-	64,745	201,665	248,455
		1,038*	0,995	-	-	-	1,028	1,002	0,914	0,834	-	1,004	0,994

Таблица 2.2 – Сопоставление  $M_{ult}$  по различным методикам для бетона классов В60, В80 и В100

Параметр	Методика	Класс бетона											
		В60				В80				В100			
		Процент армирования				Процент армирования				Процент армирования			
		Неарм.	$\mu=0,63\%$ $\xi=0,69\xi_R$	$\mu=2,31\%$ $\xi=2,51\xi_R$	$\mu=3,08\%$ $\xi=3,34\xi_R$	Неарм.	$\mu=0,63\%$ $\xi=0,28\xi_R$	$\mu=2,31\%$ $\xi=\xi_R$	$\mu=3,08\%$ $\xi=1,2\xi_R$	Неарм.	$\mu=0,63\%$ $\xi=0,12\xi_R$	$\mu=2,31\%$ $\xi=0,44\xi_R$	$\mu=3,08\%$ $\xi=0,58\xi_R$
$M_{ult}$ , кН·м	1	23,771	65,279	213,337	269,97	21,854	65,786	220,01	281,833	29,257	66,087	223,975	288,882
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	21,776	65,565	212,665	267,945	-	65,975	219,685	280,535	-	66,235	223,915	287,945
		0,916*	1,004	0,997	0,992	-	1,003	0,998	0,995	-	1,002	1,0	0,997

**Примечание:** 1 – [1] и [6]; 2 – по предложенным формулам.

\* в данной строке приведено отношение момента, полученного по сравниваемой методике, к значению по СНиП [6].

### Выводы

1. Установлено, что расхождение результатов при определении момента трещинообразования  $M_{crc}$  и разрушающего момента  $M_{ult}$  по сравниваемым методикам зависит от класса бетона по прочности и процента армирования.

2. Для сближения расчетных данных при определении  $M_{crc}$  и  $M_{ult}$ , полученных по диаграммному методу, с формулами [1], [6] в выражениях, описывающих диаграммы деформирования бетона при сжатии и растяжении, подобраны корректирующие коэффициенты, значение которых рекомендуется использовать в расчетах по диаграммной методике по общим группам предельных состояний.

3. При вычислении  $M_{crc}$ ,  $M_{ult}$  с использованием предложенных зависимостей для железобетонных сечений, в которых  $\xi \leq \xi_R$ , существенных расхождений с [6] не наблюдается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гвоздев, А.А. К расчету предварительно напряженных железобетонных и бетонных сечений по образованию трещин [Текст] / А.А. Гвоздев, С.А. Дмитриев // Бетон и железобетон. – М.: Госстрой СССР. – 1957. – №5. – С. 205-211.
- Карпенко, Н.И. К построению обобщенной зависимости для диаграммы деформирования бетона [Текст] / Н.И. Карпенко // Строительные конструкции. – Минск, 1983. – С. 164-173.
- Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона [Текст] / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
- Карпенко, Н.И. К построению методики расчета стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов [Текст] / Н.И. Карпенко, Т.А. Мухамедиев, М.А. Сапожников // Совершенствование методов расчета статически неопределимых железобетонных конструкций. – М.: 1987. – С. 4-24.
- Карпенко, С.Н. О построении связей между приращениями напряжений и деформаций на основе различных диаграмм [Текст] / С.Н. Карпенко // Вестник гражданских инженеров. – СПбТАСУ. – 2010. – №1.
- СНиП 2.03.01-84\* Бетонные и железобетонные конструкции [Текст]. – М.: НИИЖБ Госстрой СССР, 1985. – 87 с.

### Карпенко Николай Иванович

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва

Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Проблем прочности и качества в строительстве»  
E-mail: niisf\_lab9@mail.ru

### Радайкин Олег Валерьевич

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань

Ассистент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции»

E-mail: olegxxii@mail.ru

N.I. KARPENKO, O.V. RADAYKIN

**TO IMPROVE THE STRESS-STRAIN DIAGRAM  
OF CONCRETE TO DETERMINE THE CRACKING MOMENT  
AND THE FAILURE MOMENT IN BENDING REINFORCED  
CONCRETE ELEMENTS**

*The aim of the research was to improve developed by N.I. Karpenko theoretical diagrams of deformation of concrete in tension and compression to determine the cracking moment and the failure moment in bending reinforced concrete elements. For this purpose, in expressions describing the diagrams the correction coefficients are fitted. The value of which is recommended in the diagram method of calculation. As a «standard» in comparing the method of calculation adopted by the method of limiting states SNiP 2.03.01-84 \*, which based on the A.A. Gvozdev's and S.A.Dmitriev's works. Established a satisfactory convergence of the results.*

**Keywords:** *bending element, reinforced concrete, stiffness, stress-strain diagram, diagram method, the method of calculation.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Gvozdev, A.A. K raschetu predvaritel'no naprjazhennyh zhelezobetonnyh i betonnyh sechenij po obrazovaniju trevin [Tekst] / A.A. Gvozdev, S.A. Dmitriev // Beton i zhelezobeton. – M.: Gosstroj SSSR. – 1957. – №5. – S. 205-211.
2. Karpenko, N.I. K postroeniju obobwennoj zavisimosti dlja diagrammy deformirovanija betona [Tekst] / N.I. Karpenko // Stroitel'nye konstrukcii. – Minsk, 1983. – S. 164-173.
3. Karpenko, N.I. Obwie modeli mehaniki zhelezobetona [Tekst] / N.I. Karpenko. – M.: Strojizdat, 1996. – 416 s.
4. Karpenko, N.I. K postroeniju metodiki rascheta sterzhnevyyh jelementov na osnove diagramm deformirovanija materialov [Tekst] / N.I. Karpenko, T.A. Muhamediev, M.A. Sapozhnikov // Sovershenstvovanie metodov rascheta staticheski neopredelimyh zhelezobetonnyh konstrukcij. – M.: 1987. – S. 4-24.
5. Karpenko, S.N. O postroenii svjazej mezhdru prirawenijami naprjazhenij i deformacij na osnove razlichnyh diagramm [Tekst] / S.N. Karpenko // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – SPbTASU. – 2010. – №1.
6. SNiP 2.03.01-84\* Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii [Tekst]. – M.: NIIZhB Gosstroj SSSR, 1985. – 87 s.

**Karpenko Nikolay Ivanovich**

Research institute of construction physics of the Russian academy of architecture and construction sciences, Moscow  
Doctor of technical science, professor, manager of laboratory «Durability and quality problems in construction»

**Radaykin Oleg Valeryevich**

Kazan state architectural and construction university, Kazan

Assistant of department «Ferro-concrete and stone designs»

УДК 624.044.2:62-41:510.67

КОРОБКО А.В., ПРОКУРОВ М.Ю., ЧЕРНЯЕВ А.А.

## ПРОГРАММА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ПРОГИБА ИЗГИБАЕМЫХ ПЛАСТИНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТНОШЕНИЯ КОНФОРМНЫХ РАДИУСОВ, ОТОБРАЖЕННЫХ НА КРУГ ОБЛАСТЕЙ, ОГРАНИЧИВАЮЩИХ ИХ КОНТУРЫ

*Приводится описание методики и алгоритм программы определения максимального прогиба упругих пластинок в виде треугольников, ромбов, параллелограммов, трапеций с выпуклым очертанием контура и различными комбинациями граничных условий, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой. В качестве основного аргумента в исследуемой задаче используется отношение конформных радиусов, получаемых при отображении области, ограниченной их контуром, на внешнюю и внутреннюю часть круга.*

**Ключевые слова:** упругие пластинки, равномерно распределенная нагрузка, деформированное состояние, максимальные прогибы, отношение конформных радиусов, программа.

Пластинки различного очертания находят широкое применение в машиностроении и строительстве в качестве несущих и ограждающих элементов конструктивных систем. Разработка инженерно-технических решений для пластинчатых конструкций часто обусловлена постановкой и реализацией обратной задачи проектирования, связанной с оценкой их деформированного состояния по величине максимального прогиба, вызванного действием приложенной нагрузки.

В настоящее время известен ряд методов, позволяющих получать решение указанной задачи, однако, в виду их отдельных недостатков и ограничений, проблема разработки новых подходов к расчету пластинчатых конструкций сохраняет свою актуальность.

Так, использование прямых методов сопряжено с известными математическими трудностями решения дифференциальных уравнений. Их реализация ограничена рядом частных решений для пластинок простейших форм очертания и условий закреплений, что не может служить надежным основанием при разработке универсального программного обеспечения рассматриваемой задачи.

Наибольшее распространение в задачах автоматизированного расчета пластин получили численные методы – метод конечных разностей (МКР) и метод конечных элементов (МКЭ), положенный в основу современных универсальных программных комплексов SCAD, ANSYS, APM WinMachine и др. Однако использование подобных программных пакетов представляется достаточно громоздким при получении оперативного результата в задачах вариантного проектирования, а также требует определенного уровня квалификации пользователя ЭВМ. Отметим, что реализация МКЭ ориентированна исключительно на использование вычислительной техники, что зачастую приводит к потере физического смысла решаемой задачи.

Указанные трудности определяют перспективу развития геометрических методов расчета, позволяющих получить оперативную оценку физических характеристик пластинок на основе двусторонней ограниченности возможных решений при геометрическом моделировании области, очерченной их внешним контуром. Реализация таких методов не требует решения дифференциальных уравнений, приводя к получению результата с точностью, достаточной для инженерных расчетов. При этом не предусматривается использование мощных ЭВМ, и имеется возможность проведения ручного счета.

К геометрическим методам относится изопериметрический метод\* (ИЗПМ) и метод интерполяции по коэффициенту формы\* (МИКФ), где в качестве основного аргумента, по кото-

\* Впервые применен профессором В.И. Коробко для решения задач теории пластинок.

рому оцениваются получаемые решения, принята безразмерная геометрическая характеристика плоской выпуклой области – коэффициент формы, подробные сведения о котором представлены в [1].

Как отмечено в [2], подобной геометрической характеристикой может являться отношение внутреннего  $\dot{r}$  и внешнего  $\bar{r}$  конформных радиусов, получаемых при отображении односвязанной выпуклой области пластинки на внутренность и внешность круга. Такое конформное отображение задается посредством некоторой аналитической функции комплексного переменного.

Отношение  $\dot{r}/\bar{r}$ , выступающее характеристикой «правильности» или «симметричности» отображаемой области, рассматривается в данном случае как новый аргумент геометрических методов решения задач технической теории пластинок и двумерных задач теории упругости.

Отметим, что для ряда геометрических фигур (круг, правильные многоугольники, произвольные треугольники и ромбы) выполняется замечательная зависимость, позволяющая подвести под них общую геометрическую основу:

$$A = \pi \dot{r} \bar{r}.$$

(1)

Приведем известные из научной и справочной литературы формулы нахождения внутреннего и внешнего конформных радиусов ряда односвязных областей с выпуклым контуром [3]:

– *круг* радиуса  $a$ :

$$\dot{r} = a, \bar{r} = a;$$

– *правильный многоугольник*:

$$\dot{r} = \frac{\Gamma(1-1/n)}{2^{1-\frac{2}{n}} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right)} L; \bar{r} = \frac{\Gamma(1+1/n)}{2^{1+\frac{2}{n}} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{n}\right)} L,$$

где  $n$  – число сторон;  $L$  – периметр;  $\Gamma(x)$  –  $\Gamma$ -функция (Гамма-функция);

– *произвольный треугольник* с углами  $\pi\alpha$ ,  $\pi\beta$ ,  $\pi\gamma$ :

$$\dot{r} = 4\pi \cdot f(\alpha)f(\beta)f(\gamma) \cdot \rho,$$

где  $f(x) = \frac{1}{\Gamma(x)} \left\{ \frac{x^x}{(1-x)^{1-x}} \right\}^{1/2}$ ;  $\rho$  – радиус описанного круга; значение внешнего конформного радиуса  $\bar{r}$  для треугольных областей, можно определить из выражения (1);

– *ромб* с углом  $\pi\alpha$ :

$$\dot{r} = \frac{\pi^{1/2}}{\Gamma\left(\frac{\alpha}{2}\right) \Gamma\left(\frac{1-\alpha}{2}\right)} L; \bar{r} = \frac{\pi^{1/2}}{8\Gamma\left(1-\frac{\alpha}{2}\right) \Gamma\left(\frac{1+\alpha}{2}\right)} L;$$

– *эллипс* с полуосями  $a \geq b$ :

$$\dot{r} = \bar{r} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} z^{n(n+1)} \right\}^{-1} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} z^{n^2} \right\}^{-1}, \bar{r} = \frac{a+b}{2},$$

где  $z = (a-b)^2 / (a+b)^2$ .

Формула для определения внутреннего конформного радиуса  $\dot{r}$  для *прямоугольников* с полуосями  $a \geq b$  имеет вид:

$$\dot{r} = \frac{2}{\pi} b \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} z^{n^2} \right)^{-2},$$

где  $z = e^{-\pi a/b}$ .

\* Разработан профессором А.В. Коробко.

Определение внешнего конформного радиуса  $\bar{r}$  для прямоугольной области предусматривает решение системы уравнений относительно  $\bar{r}$  и  $\alpha$ , полученных с помощью формулы Кристоффеля-Шварца в [4]:

$$\begin{cases} \frac{a}{\bar{r}} = \pi \cos^2 \alpha \sum_{k=0}^{\infty} \frac{((2k-1)!!)^2}{2^{2k} (k+1)! k!} \cos^{2k} \alpha; \\ \frac{b}{\bar{r}} = \pi \sin^2 \alpha \sum_{k=0}^{\infty} \frac{((2k-1)!!)^2}{2^{2k} (k+1)! k!} \sin^{2k} \alpha, \end{cases} \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – стороны прямоугольника, параллельные соответственно осям  $x$  и  $y$ ;  $\alpha$  – аргумент комплексных чисел для точек окружности, образами которых при конформном отображении служат вершины прямоугольника, центр которого совпадает с началом координат. Для выражений системы (2) принято тождество  $(-1)!! = 1$ .

Определение максимальных прогибов упругих пластинок с использованием аргумента  $i/\bar{r}$  реализовано в программном комплексе «RRMaximalDeflectionPlate» для следующих видов очертаний контура: треугольники (равнобедренные, прямоугольные, произвольные); ромбы; прямоугольники; трапеции (равнобедренные, прямоугольные, произвольные); правильные многоугольники; эллипсы. К рассмотрению приняты изотропные пластинки средней толщины, геометрические параметры которых удовлетворяют неравенству:

$$D_{\min} / 100 < t < D_{\min} / 10,$$

где  $t$  – толщина пластинки,  $D_{\min}$  – минимальный габаритный размер в плане. Предполагается, что такие пластинки работают как жесткие и допускают малые прогибы:  $w_0 < t/5$ , где  $w_0$  – максимальное значение прогиба пластинки.

В качестве исходных данных к расчету принимаются следующие физические величины:  $q$  – значение нагрузки, равномерно распределенной по всей поверхности пластинки;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости материала.

Общим геометрическим параметром для всех видов пластинок является контролируемое значение их толщины  $t = const$ . Другие исходные геометрические данные зависят от формы рассматриваемых пластинок:

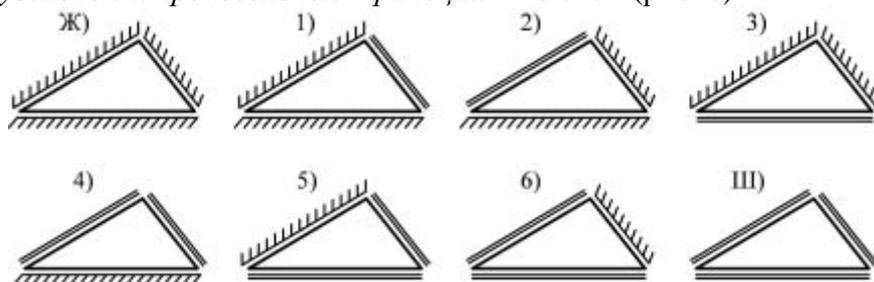
- *равнобедренные треугольники*:  $\alpha$  – угол при основании;  $a$  – длина основания;
- *прямоугольные треугольники*:  $\alpha$  – один из острых углов;  $a$  – длина прилежащего катета;
- *произвольные треугольники*:  $\alpha, \beta$  – углы треугольника;  $a$  – длина его стороны, находящаяся между ними;
- *ромбы*:  $\alpha$  – острый угол;  $a$  – длина стороны;
- *прямоугольники*:  $a, b$  – длины сторон;
- *параллелограммы*:  $\alpha$  – острый угол;  $a$  – большая сторона;  $h$  – меньшая высота;
- *равнобедренные трапеции*:  $\alpha$  – острый угол при большем основании;  $a$  – длина большего основания;  $h$  – высота;
- *прямоугольные трапеции*:  $\alpha$  – острый угол;  $a$  – примыкающее основание;  $h$  – высота;
- *произвольные трапеции*:  $\alpha, \beta$  – острые углы при основании;  $a$  – основание, находящееся между ними;  $h$  – высота;
- *правильные многоугольники*:  $n$  – число сторон;  $a$  – длина стороны;
- *эллипсы*:  $a, b$  – длины полуосей.

Угловые меры фигур приняты в градусах, линейные длины – в метрах.

В качестве граничных условий рассматриваются: жесткое защемление и шарнирное опирание по всему контуру, а также все возможные комбинации их сочетаний по отдельным сторонам пластинок. Возможные комбинации граничных условий для характерных очертаний контура пластинок представлены в виде исчерпывающего набора схем:

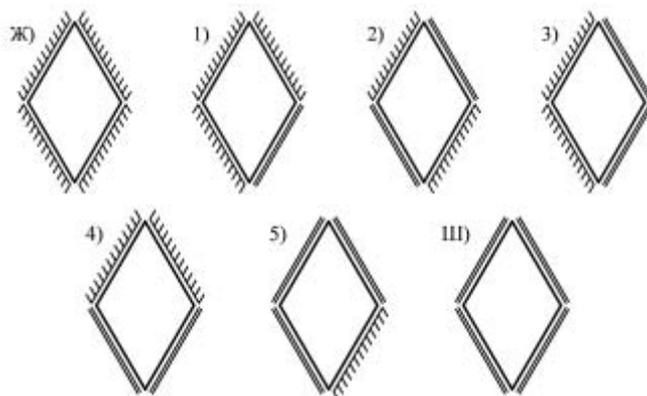
- *равнобедренные треугольники* – 6 возможных схем;
- *прямоугольные и произвольные треугольники* – 8 схем (рис. 1);
- *ромбы* – 7 схем (рис. 2);
- *прямоугольники* – 9 схем;

- параллелограммы – 10 схем (рис. 3);
- равнобедренные трапеции – 12 схем;
- прямоугольные и произвольные трапеции – 16 схем (рис. 6).

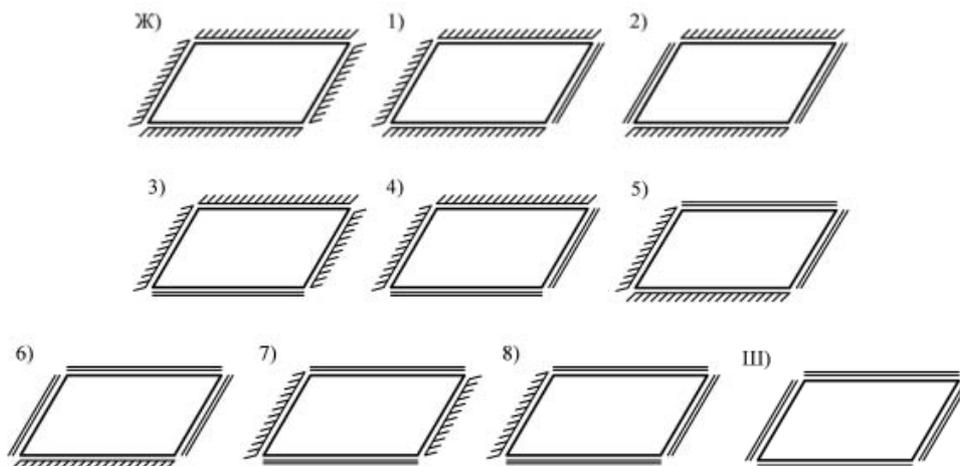


*Ж – жесткое защемление по всему контуру;  
Ш – шарнирное опирание по всему контуру;  
1, 2, 3, ... – возможные комбинации граничных условий*

*Рисунок 1 – Комбинации граничных условий для пластинок в виде произвольного треугольника*



*Рисунок 2 – Комбинации граничных условий для ромбических пластинок*



*Рисунок 3 – Комбинации граничных условий для параллелограммных пластинок*

Комбинации граничных условий трапецевидных пластинок приведены далее на рисунке 6.

Для *правильных многоугольников* в силу изначальной неопределенности числа их сторон рассмотрено только жесткое или шарнирное опирание по всему контуру.

Для пластинок в форме эллипса рассмотрение граничных условий ограничивается жестким защемлением, так как приведенные значения прогибов шарнирно опертых криволинейных пластинок зависят, в том числе, от величины коэффициента Пуассона.

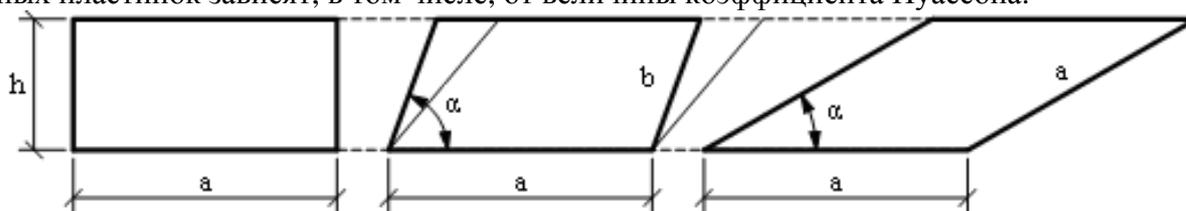


Рисунок 4 – Геометрическое преобразование с использованием аффинного сдвига прямоугольника вдоль большей стороны до образования ромба

В основе расчета значения максимального прогиба лежит следующая зависимость:

$$w_0 = k_w \frac{q A^2}{D},$$

где  $A$  – площадь пластинки,  $D$  – ее цилиндрическая жесткость,  $k_w$  – коэффициент пропорциональности, рассматриваемый для ряда характерных видов очертаний как некоторая функция, взятая от отношения конформных радиусов.

Решения для равнобедренных и прямоугольных треугольных, ромбических, прямоугольных, правильных многоугольных и эллиптических пластинок определяются согласно функциональным зависимостям вида  $k_w = f(\dot{r}/\bar{r})$ , приведенным в [2] и [5], где установлено, что эти выражения служат двусторонними границами всего множества возможных решений задачи о величине максимального прогиба рассматриваемых пластинок.

Решения для произвольных треугольных, параллелограммных и трапециевидных пластинок определяются аналогично МИКФ, подробно рассмотренному в [1]. При этом вместо коэффициента формы искомое решение интерполируется по аргументу  $\dot{r}/\bar{r}$ . Расчетные формулы в данном случае принимают следующий вид:

$$w_0 = w_{01} \left( \frac{(\dot{r}/\bar{r}) \times \frac{A_1}{A}}{(\dot{r}/\bar{r})_1} \right)^n \text{ при } n = \frac{\ln(w_{02}/w_{01})}{\ln\left(\frac{(\dot{r}/\bar{r})_2 \times \frac{A_1}{A}}{(\dot{r}/\bar{r})_1}\right)},$$

где  $w_{01}$ ,  $w_{02}$  – известные значения максимальных прогибов пластинок, принимаемые в качестве опорных решений;  $A_1$ ,  $A_2$  – площади этих пластинок;  $(\dot{r}/\bar{r})_1$ ,  $(\dot{r}/\bar{r})_2$  – соответствующие им отношения конформных радиусов;  $A$  и  $(\dot{r}/\bar{r})$  – те же параметры для рассчитываемой пластинки.

Предполагается, что рассматриваемая пластинка получается путем аффинного преобразования одной опорной пластинки в другую. Например, в качестве опорных фигур для параллелограммной пластинки выступают прямоугольная и ромбическая, переходящая одна в другую путем аффинного сдвига, как показано на рисунке 4.

Раздельное рассмотрение трапециевидных пластинок (равнобедренные, прямоугольные, произвольные) введено в связи с различными видами применяемых преобразований опорных фигур.

В результате расчета программа определяет величины максимальных прогибов пластинок для возможных комбинаций граничных условий в двух вариантах:

1) относительное значение  $k_w$  с размерностью  $qA^2/D$ , зависящее лишь от геометрической формы пластинки и принятой комбинации ее граничных условий;

2) абсолютная величина максимального прогиба  $w_0$  с размерностью в миллиметрах, зависящая, в том числе, от физических характеристик материала пластинки и значения внешней нагрузки.

Для справки предусмотрен вывод значения отношения конформных радиусов, получаемых при отображении области, ограниченной контуром рассматриваемой пластинки.

Общий алгоритм, реализуемый программой, представлен на рисунке 5.

Результаты работы программы при расчете пластинок произвольного трапецидального очертания показаны на рисунке 6.

Разработанное программное обеспечение может быть использовано при проведении деформационных расчетов пластинчатых конструкций в строительстве и машиностроении.

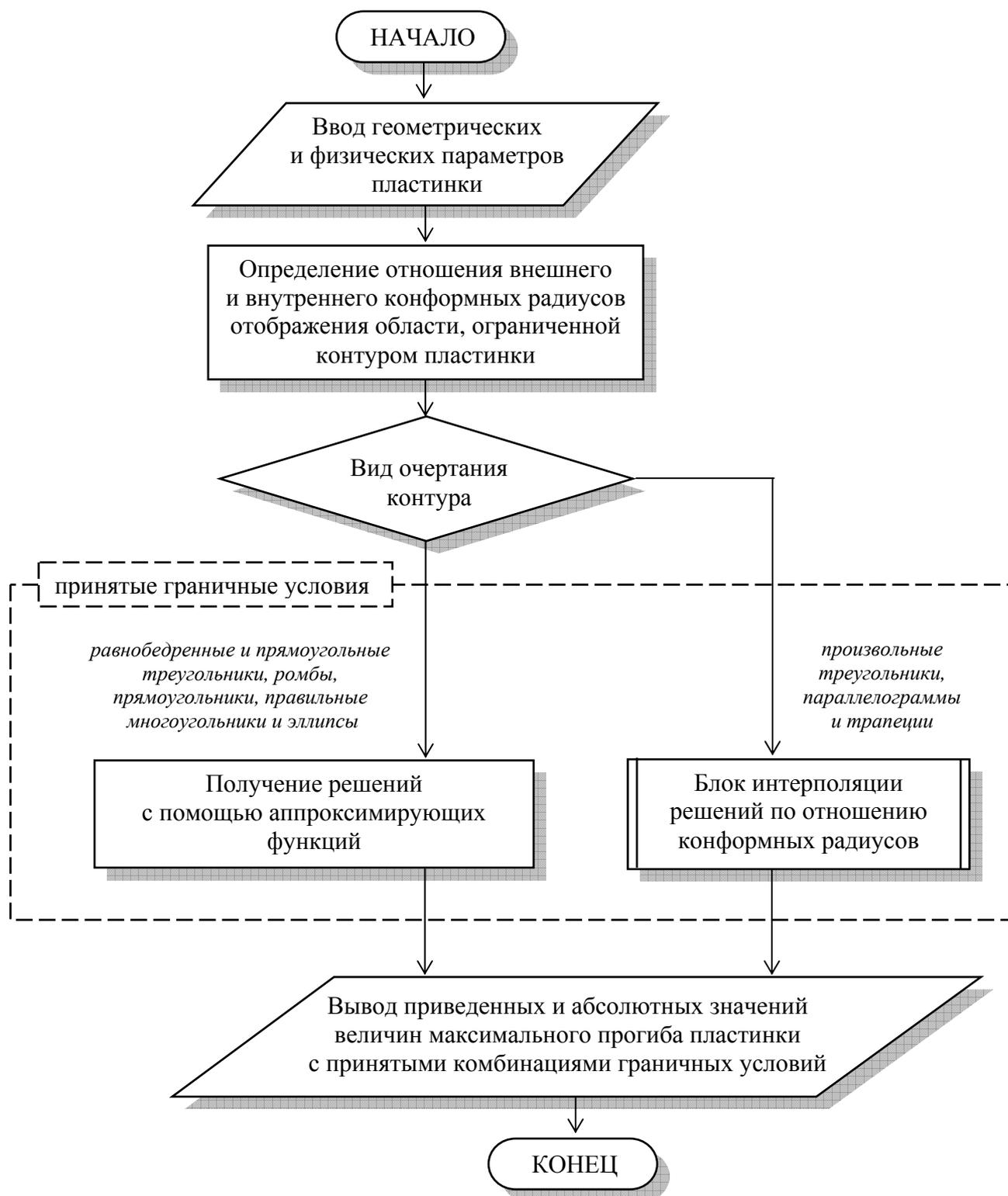


Рисунок 5 – Общий алгоритм программы «RRMaximalDeflectionPlate»

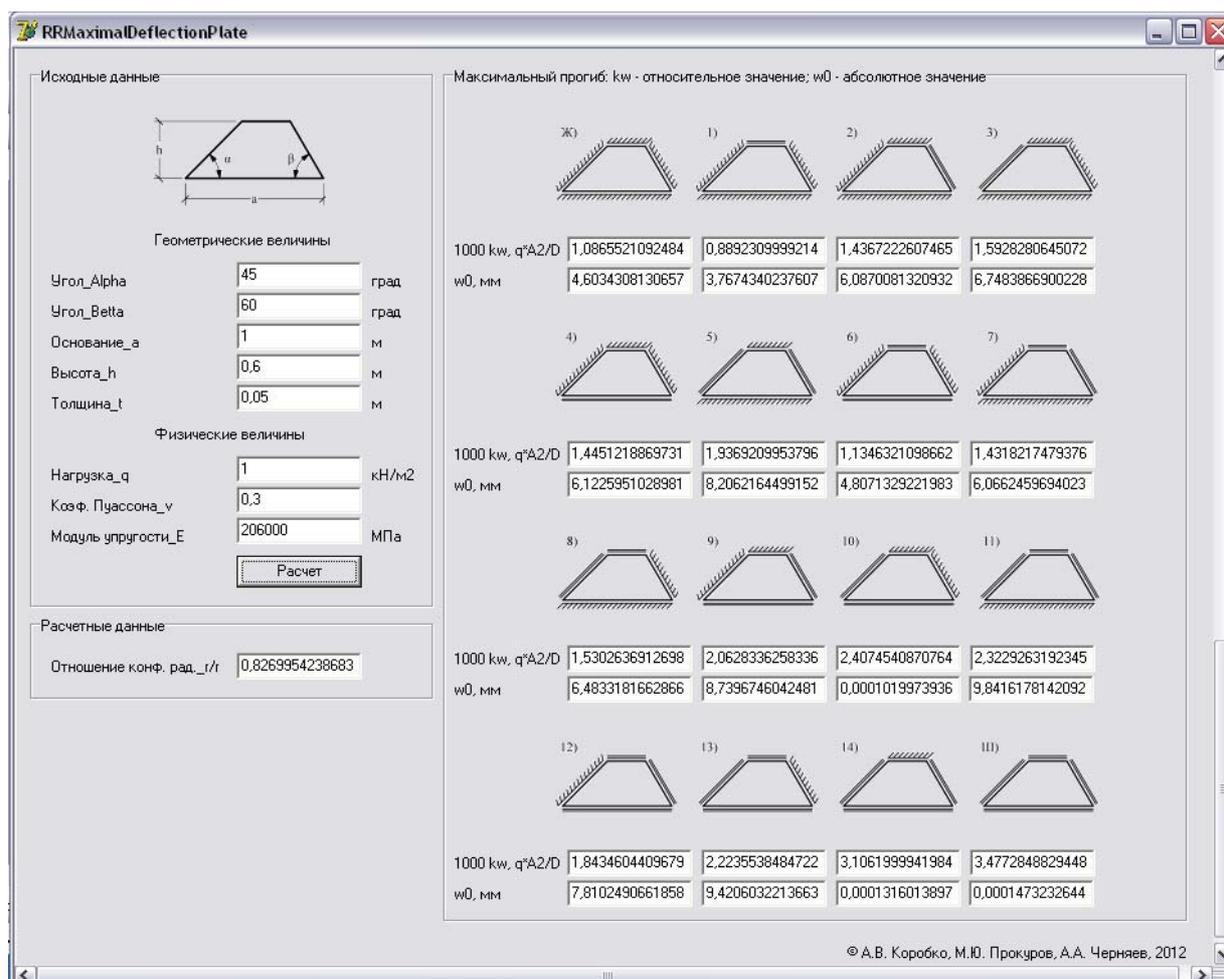


Рисунок 6 – Экранное представление работы программы «RRMaximalDeflectionPlate» с видами граничных условий трапецевидных пластинок

### Основные выводы:

1. Предложен новый аргумент геометрических методов решения задач технической теории пластинок – отношение внутреннего и внешнего конформных радиусов, получаемых при отображении области, ограниченной их контуром на внешнюю и внутреннюю часть окружности.
2. Разработана методика расчета максимальных прогибов, обусловленных действием равномерно распределенной нагрузки, для изотропных упругих пластинок выпуклого очертания при комбинированных граничных условиях их контура на основе принятого геометрического аргумента.
3. Разработано программное обеспечение для проведения деформационных расчетов пластинок конструкций указанного вида.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: АСВ, 1999. – 320 с.
2. Коробко, В.И. Решение задач поперечного изгиба пластинок с использованием конформных радиусов [Текст] / В.И. Коробко, А.А. Черняев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – №6. – С. 16-22.
3. Полия, Г. Изопериметрические неравенства в математической физике: Пер. с англ. Изд. 2-е, стереотипное [Текст] / Г. Полия, Г. Сеге. – М.: КомКнига, 2006. – 336 с.
4. Казанцев, В.П. Электростатика на плоскости. Нормировка потенциала. Емкости уединенного проводника и линии относительно точки. Конформные радиусы [Текст] / В.П. Казанцев, О.А. Золотов, М.В. Долгополова // Вестник КрасГУ. Серия физ.-мат. науки. – Красноярск: КрасГУ. – 2005. – №1. – С. 32-38.

5. Черняев, А.А. Определение максимального прогиба треугольных пластинок с комбинированными граничными условиями с использованием отношения конформных радиусов [Текст] / А.А. Черняев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – №6. – С. 23-29.

**Коробко Андрей Викторович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика»  
E-mail: oantc@ostu.ru

**Прокуров Максим Юрьевич**

ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия», г. Брянск  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции»  
Тел.: +7 (4832) 64-59-15  
E-mail: m.prokuroff@mail.ru

**Черняев Андрей Александрович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»

---

A.V. KOROBKO, M.YU. PROKUROV, A.A. CHERNYAEV

**PROGRAM OF DEFINITION MAXIMAL DEFLECTION  
OF BENT PLATES WITH USE THE RELATIONS OF CONFORMAL  
RADIUSSES DISPLAYED ON THE CIRCLE OF THE AREAS  
LIMITING THEIR CONTOURS**

*In article description of a technique and algorithm of the program of definition of the maximum deflection of elastic plates in the form of triangles, rhombuses, parallelograms, trapezes with a convex outline of a contour and various combinations of the boundary conditions loaded with evenly distributed loading is provided. As the main argument in a studied task is used the relation of the conformal radiusses received at display of area, limited to their contour, on an external and internal part of a circle.*

**Keywords:** *elastic plates, evenly distributed loading, deformed condition, maximum deflections, relation of conformal radiusses, program.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Korobko, A.V. Geometricheskoe modelirovanie formy oblasti v dvumernyh zadachah teorii uprugosti [Tekst] / A.V. Korobko. – M.: ASV, 1999. – 320 s.
2. Korobko, V.I. Reshenie zadach poperechnogo izgiba plastinok s ispol'zovaniem konformnyh radiusov [Tekst] / V.I. Korobko, A.A. Chernjaev // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – 2011. – №6. – S. 16-22.
3. Polia, G. Izoperimetricheskie neravenstva v matematicheskoj fizike: Per. s angl. Izd. 2-e, steriotipnoe [Tekst] / G. Polia, G. Sege. – M.: KomKniga, 2006. – 336 s.
4. Kazancev, V.P. Jelektrostatika na ploskosti. Normirovka potenciala. Emkosti uedinjonnoogo provodnika i linii otnositel'no tochki. Konformnye radiusy [Tekst] / V.P. Kazancev, O.A. Zolotov, M.V. Dolgopolova // Vestnik KrasGU. Serija fiz.-mat. nauki. – Krasnojarsk: KrasGU. – 2005. – №1. – S. 32-38.
5. Chernjaev, A.A. Opredelenie maksimal'nogo progiba treugol'nyh plastinok s kombinirovannymi granichnymi uslovijami s ispol'zovaniem otnoshenija konformnyh radiusov [Tekst] / A.A. Chernjaev // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – 2011. – №6. – S. 23-29.

**Korobko Andrew Viktorovich**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Doctor of technical science, professor of department «Theoretical and applied mechanics»  
E-mail: oantc@ostu.ru

**Prokurov Maxim Yuryevich**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk  
Candidate of technical sciences, associate professor of department «Building designs»  
Tel.: +7 (4832) 64-59-15  
E-mail: m.prokuroff@mail.ru

**Chernyaev Andrew Aleksandrovich**

State university – educational-science-production complex, Orel

Post-graduate student of department «Building designs and materials»

УДК 624.04

КОРОБКО В.И., САВИН С.Ю.

## ИЗГИБ ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИНОК В ВИДЕ РОМБОВ С КОМБИНИРОВАННЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

*В статье рассматриваются задачи поперечного изгиба упругих ортотропных пластинок в виде ромбов, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой, при однородных и комбинированных граничных условиях. По значениям максимальных прогибов, полученным с помощью МКЭ, построены аппроксимирующие функции, аргументами которых являются коэффициент формы и соотношения цилиндрических жесткостей. Эти функции могут быть использованы непосредственно для нахождения значений максимальных прогибов пластинок в виде ромбов либо для получения опорных значений при решении задачи поперечного изгиба ортотропных пластин в виде параллелограммов методом интерполяции по коэффициенту формы.*

**Ключевые слова:** ортотропные пластинки в виде ромбов, максимальный прогиб, однородные и комбинированные граничные условия, метод интерполяции по коэффициенту формы.

В последнее время, несмотря на широкое применение численных методов при решении задач технической теории пластинок, не ослабевает интерес к приближенным аналитическим методам расчета таких конструкций. Это обусловлено, прежде всего, возможностью получения выражений для искомой величины в аналитической форме, что позволяет не только избежать дополнительных вычислительных операций, но и предоставляет широкие возможности для анализа, делает более понятной физическую сторону задачи. К числу таких методов относится метод интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ), предложенный А.В. Коробко. Его основы достаточно полно изложены в монографии [1], поэтому здесь лишь кратко скажем о его сути.

Пусть для пластинки заданной формы необходимо найти значение интегральной физической характеристики (максимальный прогиб, частота собственных колебаний, критическая сила). Если форму заданной пластинки можно получить в результате какого-либо геометрического преобразования из двух других пластинок, интегральные физические характеристики которых известны (опорные решения), то искомая величина может быть найдена интерполяцией опорных решений по коэффициенту формы. Поэтому одно из направлений развития МИКФ связано с построением граничных кривых для пластинок определенных форм и различными комбинациями граничных условий, которые бы могли использоваться в качестве опорных решений.

МИКФ продемонстрировал свою эффективность при расчете изотропных пластинок, однако к расчету ортотропных этот метод практически не применялся. Известны лишь решения для форм областей в виде прямоугольников [2, 5], треугольников [3, 6], правильных многоугольников [4]. Поэтому в настоящей статье выполняется построение аппроксимирующих функций максимальных прогибов для упругих ортотропных пластинок в виде ромбов при комбинированных граничных условиях (сочетание шарнирного опирания и жесткого защемления по контуру), находящихся под действием равномерно распределенной по их поверхности нагрузки. Оси ортотропии направлены через вершины ромбической пластинки (рис. 1). Построение аппроксимирующих функций для максимальных прогибов ортотропных пластин в виде ромбов выполнено путем численного решения соответствующих задач с помощью МКЭ с применением программного комплекса SCAD (с числом конечных элементов не менее 500).

Для ортотропной пластинки при ее поперечном изгибе из теории упругости известно следующее дифференциальное уравнение:

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q, \quad (1)$$

где  $H = D_1 + 2D_{xy}$ ,  $D_1 = D_x \nu_y = D_y \nu_x$ .

В этих выражениях  $D_x, D_y, D_{xy}$  – цилиндрические жесткости пластинки;  $\nu_x, \nu_y$  – коэффициенты Пуассона по соответствующим направлениям.

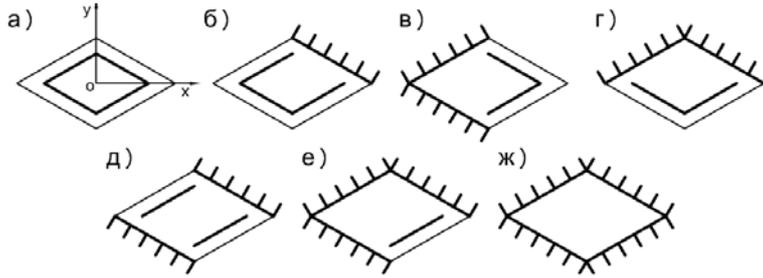


Рисунок 1 – Пластинки в виде ромбов с однородными и комбинированными граничными условиями

Разделим правую и левую части уравнения (1) на  $H$ :

$$\frac{D_x}{H} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{D_y}{H} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{H}. \quad (2)$$

В этом случае при прочих одинаковых условиях (форма пластинки, нагрузка  $q$ , граничные условия и цилиндрическая жесткость  $H$ ) решение будет зависеть от двух параметров этого уравнения –  $D_x/H$ ;  $D_y/H$ .

В изопериметрическом виде выражение для определения максимальных прогибов изотропной пластинки представляется зависимостью [1]:

$$w = K_w \frac{qA^2}{DK_f^2}, \quad (3)$$

где  $K_f = \oint_L \frac{ds}{h}$  – коэффициент формы;  $K_w$  – некоторая функция, зависящая от граничных условий, постоянная для пластин с формой области одного класса (прямоугольные, трапециевидные и т.д.). Однако для ортотропных пластинок функция  $K_w$  будет также зависеть и от отношения цилиндрических жесткостей  $D_x/H$  и  $D_y/H$ .

Осуществим замену отношения  $K_w/K_f^2$  на функцию  $f(K_f; D_x/H; D_y/H)$ . Тогда выражение (3) для ортотропных пластинок примет следующий вид:

$$w = f(K_f; D_x/H; D_y/H) \frac{qA^2}{H}. \quad (4)$$

Неизвестную функцию  $f$  в этом выражении будем искать следующим образом. По значениям максимальных прогибов, используя программный комплекс *Table Curve 3D*, построим аппроксимирующие функции  $\varphi_n(D_x/H; D_y/H)$ , где  $n$  соответствует одному из углов между сторонами ромба:

$$\varphi_n = a_n + b_n \frac{H}{D_x} + c_n \frac{H}{D_y} + d_n \frac{H^2}{D_x^2} + e_n \frac{H^2}{D_y^2} + f_n \frac{H^2}{D_x D_y} + g_n \frac{H^3}{D_x^3} + h_n \frac{H^3}{D_y^3} + i_n \frac{H^3}{D_x D_y^2} + j_n \frac{H^3}{D_x^2 D_y}. \quad (5)$$

Коэффициенты  $a_n, \dots, j_n$  в этом выражении будут изменяться в зависимости от угла между сторонами пластинки. Учитывая это, представим коэффициенты  $a_n, \dots, j_n$  в виде функций  $\psi_{k,l}(K_f)$ , постоянных при заданных граничных условиях, где индекс  $k$  соответствует коэффициентам  $a_n, \dots, j_n$  выражения (5), а  $l$  – вариантам граничных условий. Неизвестные функции найдем, воспользовавшись программным комплексом *Table Curve 2D*. По результатам вычислений была получена функция следующего вида:

$$\psi_{k,l}(K_f) = A_{k,l} + \frac{B_{k,l}}{K_f} + \frac{C_{k,l}}{K_f^2} + \frac{D_{k,l}}{K_f^3} + \frac{E_{k,l}}{K_f^4} + \frac{F_{k,l}}{K_f^5} + \frac{G_{k,l}}{K_f^6} + \frac{H_{k,l}}{K_f^7} + \frac{I_{k,l}}{K_f^8} + \frac{J_{k,l}}{K_f^9}. \quad (6)$$

Значения коэффициентов  $A_{k,l}, \dots, I_{k,l}$  для соответствующих  $\psi_{k,l}$  и граничных условий приведены в таблице 1. Для наглядности на рисунке 2 приведен график зависимости  $W - K_f$  для ортотропных пластинок в виде ромбов с комбинированными граничными условиями (рис. 1, з) при следующих соотношениях цилиндрических жесткостей:  $D_x/H = 4,5$  и  $D_y/H = 3$ .

Таблица 1 – Значения коэффициентов  $A_{k,l}, \dots, I_{k,l}$

Коэффициенты в (5)		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>J</i>
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Шарнирное опирание по контуру (рис. 1, а)											
Коэффициенты выражения (б)	<i>A</i>	0,2695	-0,9946	-0,4503	-8,518	15,92	-4,586	4,397	-10,82	6,656	-1,582
	<i>B</i>	-24,72	108,2	16,68	927,1	-1655	493,4	-483,3	1131	-722,7	180,4
	<i>C</i>	961,6	-5184	754,9	-44389	75548	-23350	23366	-51848	34514	-9030
	<i>D</i>	-20508	143537	-63467	$1,2 \cdot 10^6$	$-2,0 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^5$	$-6,5 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$	$-9,5 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^5$
	<i>E</i>	$2,6 \cdot 10^5$	$-2,5 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^6$	$-2,2 \cdot 10^7$	$3,3 \cdot 10^7$	$-1,1 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^7$	$-2,3 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^7$	$-4,8 \cdot 10^6$
	<i>F</i>	$-1,8 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^7$	$-3,0 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^8$	$-3,7 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^8$	$-1,4 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^8$	$-1,9 \cdot 10^8$	$5,8 \cdot 10^7$
	<i>G</i>	$4,8 \cdot 10^6$	$-2,3 \cdot 10^8$	$2,9 \cdot 10^8$	$-1,9 \cdot 10^9$	$2,7 \cdot 10^9$	$-9,7 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^9$	$-1,9 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$-4,6 \cdot 10^8$
	<i>H</i>	$1,8 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^9$	$-1,7 \cdot 10^9$	$9,4 \cdot 10^9$	$-1 \cdot 10^{10}$	$4,7 \cdot 10^9$	$-5,2 \cdot 10^9$	$8,7 \cdot 10^9$	$-7,3 \cdot 10^9$	$2,3 \cdot 10^9$
	<i>I</i>	$-1,6 \cdot 10^8$	$-3,2 \cdot 10^9$	$5,7 \cdot 10^9$	$-3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$	$-1 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$-2 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$-6,8 \cdot 10^9$
	<i>J</i>	$3,4 \cdot 10^8$	$4,0 \cdot 10^9$	$-8,0 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{10}$	$-4 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$-2 \cdot 10^{10}$	$2,8 \cdot 10^{10}$	$-3 \cdot 10^{10}$	$8,7 \cdot 10^9$
Комбинированное опирание по контуру (рис. 1, б)											
Коэффициенты выражения (б)	<i>A</i>	0,4573	-1,181	-1,597	-7,915	15,77	-0,1279	4,597	-11,18	5,233	-3,056
	<i>B</i>	-44,38	129,0	133,3	861,4	-1629	19,08	-506,1	1164	-573,7	339,6
	<i>C</i>	1867	-6209	-4437	-41236	73794	-1179	24508	-53224	27677	-16590
	<i>D</i>	-44559	172875	69292	$1,1 \cdot 10^6$	$-1,9 \cdot 10^6$	40405	$-6,9 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$	$-7,7 \cdot 10^5$	$4,7 \cdot 10^5$
	<i>E</i>	$6,6 \cdot 10^5$	$-3,1 \cdot 10^6$	$-3,0 \cdot 10^5$	$-2,0 \cdot 10^7$	$3,2 \cdot 10^7$	$-8,6 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^7$	$-2,4 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$	$-8,4 \cdot 10^6$
	<i>F</i>	$-6 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^7$	$-7,1 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^8$	$-3,5 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^7$	$-1,4 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^8$	$-1,6 \cdot 10^8$	$9,9 \cdot 10^7$
	<i>G</i>	$3,8 \cdot 10^7$	$-2,8 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^8$	$-1,8 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^9$	$-1,0 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^9$	$-1,9 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^9$	$-7,7 \cdot 10^8$
	<i>H</i>	$-1 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^9$	$-1,0 \cdot 10^9$	$8,7 \cdot 10^9$	$-1 \cdot 10^{10}$	$5,9 \cdot 10^8$	$-5,5 \cdot 10^9$	$8,8 \cdot 10^9$	$-6,1 \cdot 10^9$	$3,8 \cdot 10^9$
	<i>I</i>	$2,7 \cdot 10^8$	$-4,0 \cdot 10^9$	$3,9 \cdot 10^9$	$-3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$	$-1,9 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{10}$	$-2 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$-1 \cdot 10^{10}$
	<i>J</i>	$-2 \cdot 10^8$	$5,0 \cdot 10^9$	$-6,0 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{10}$	$-4 \cdot 10^{10}$	$2,6 \cdot 10^9$	$-2 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$	$-2 \cdot 10^{10}$	$10^{10}$
Комбинированное опирание по контуру (рис. 1, в)											
Коэффициенты выражения (б)	<i>A</i>	-0,0352	-1,792	3,370	-3,730	7,065	-6,085	2,430	-5,933	4,654	-0,0142
	<i>B</i>	6,993	201,5	-394,1	400,5	-706,7	656	-268,9	610,4	-514,5	17,11
	<i>C</i>	-481,4	-9969	20150	-18888	30919	-31108	13072	-27572	25025	-1568
	<i>D</i>	17187	$2,8 \cdot 10^5$	$-5,9 \cdot 10^5$	$5,1 \cdot 10^5$	$-7,8 \cdot 10^5$	$8,5 \cdot 10^5$	$-3,7 \cdot 10^5$	$7,2 \cdot 10^5$	$-7,0 \cdot 10^5$	63979
	<i>E</i>	$-3,7 \cdot 10^5$	$-5,2 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^7$	$-8,9 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^7$	$-1,5 \cdot 10^7$	$6,5 \cdot 10^6$	$-1,2 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^7$	$-1,5 \cdot 10^6$
	<i>F</i>	$5,0 \cdot 10^6$	$6,2 \cdot 10^7$	$-1,3 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^8$	$-1,3 \cdot 10^8$	$1,7 \cdot 10^8$	$-7,7 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^8$	$-1,5 \cdot 10^8$	$2,1 \cdot 10^7$
	<i>G</i>	$-4,3 \cdot 10^7$	$-4,9 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^9$	$-7,6 \cdot 10^8$	$8,9 \cdot 10^8$	$-1,3 \cdot 10^9$	$6,0 \cdot 10^8$	$-9,4 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^9$	$-1,9 \cdot 10^8$
	<i>H</i>	$2,3 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^9$	$-5,5 \cdot 10^9$	$3,7 \cdot 10^9$	$-3,9 \cdot 10^9$	$6,3 \cdot 10^9$	$-2,9 \cdot 10^9$	$4,3 \cdot 10^9$	$-5,7 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^9$
	<i>I</i>	$-7,1 \cdot 10^8$	$-7,2 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{10}$	$-1 \cdot 10^{10}$	$9,7 \cdot 10^9$	$-2 \cdot 10^{10}$	$8,4 \cdot 10^9$	$-1 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$-3,5 \cdot 10^9$
	<i>J</i>	$9,5 \cdot 10^8$	$9,3 \cdot 10^9$	$-2 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{10}$	$-1 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$-1 \cdot 10^{10}$	$10^{10}$	$-2 \cdot 10^{10}$	$4,8 \cdot 10^9$
Комбинированное опирание по контуру (рис. 1, з)											
Коэффициенты выражения (б)	<i>A</i>	0,3333	-3,231	-0,0021	-2,201	11,95	-4,013	2,147	-8,764	6,051	-2,237
	<i>B</i>	-33,00	352,4	-25,09	240,5	-1245	433,3	-237,8	920,4	-658,1	249,4
	<i>C</i>	1423	-16912	2419	-11555	56918	-20588	11585	-42460	31491	-12227
	<i>D</i>	-35016	$4,7 \cdot 10^5$	$-1,0 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^5$	$-1,5 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^5$	$-3,3 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^6$	$-8,7 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^5$
	<i>E</i>	$5,4 \cdot 10^5$	$-8,3 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^6$	$-5,7 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^7$	$-9,9 \cdot 10^6$	$5,8 \cdot 10^6$	$-1,9 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$	$-6,2 \cdot 10^6$
	<i>F</i>	$-5,4 \cdot 10^6$	$9,6 \cdot 10^7$	$-3,4 \cdot 10^7$	$6,6 \cdot 10^7$	$-2,8 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^8$	$-6,9 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^8$	$-1,8 \cdot 10^8$	$7,4 \cdot 10^7$
	<i>G</i>	$3,6 \cdot 10^7$	$-7,4 \cdot 10^8$	$3,1 \cdot 10^8$	$-5,1 \cdot 10^8$	$2,0 \cdot 10^9$	$-8,7 \cdot 10^8$	$5,4 \cdot 10^8$	$-1,6 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^9$	$-5,8 \cdot 10^8$
	<i>H</i>	$-1,4 \cdot 10^8$	$3,6 \cdot 10^9$	$-1,7 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^9$	$-9,4 \cdot 10^9$	$4,2 \cdot 10^9$	$-2,7 \cdot 10^9$	$7,4 \cdot 10^9$	$-6,7 \cdot 10^9$	$2,9 \cdot 10^9$
	<i>I</i>	$3,3 \cdot 10^8$	$-1 \cdot 10^{10}$	$5,6 \cdot 10^9$	$-7,1 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^{10}$	$-1 \cdot 10^{10}$	$7,6 \cdot 10^9$	$-2 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$-8,3 \cdot 10^9$
	<i>J</i>	$-3,1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{10}$	$-7,7 \cdot 10^9$	$8,9 \cdot 10^9$	$-3 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$-9,7 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{10}$	$-2 \cdot 10^{10}$	$10^{10}$
Комбинированное опирание по контуру (рис. 1, д)											
Коэффициенты выражения (б)	<i>A</i>	0,3848	-2,925	0,3229	-2,4784	12,29	-5,166	2,312	-9,413	6,595	-1,850
	<i>B</i>	-38,08	319,3	-63,65	271,1	-1274	558,5	-256,9	986,8	-718,0	208,7
	<i>C</i>	1641	-15335	4418	-13049	58005	-26567	12553	-45435	34391	-10342
	<i>D</i>	-40382	$4,3 \cdot 10^5$	$-1,6 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^5$	$-1,5 \cdot 10^6$	$7,3 \cdot 10^5$	$-3,5 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^6$	$-9,5 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^5$
	<i>E</i>	$6,2 \cdot 10^5$	$-7,5 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^6$	$-6,4 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^7$	$-1,3 \cdot 10^7$	$6,4 \cdot 10^6$	$-2,0 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^7$	$-5,4 \cdot 10^6$
	<i>F</i>	$-6,3 \cdot 10^6$	$8,8 \cdot 10^7$	$-4,8 \cdot 10^7$	$7,5 \cdot 10^7$	$-2,8 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^8$	$-7,5 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^8$	$-2,0 \cdot 10^8$	$6,4 \cdot 10^7$
	<i>G</i>	$4,1 \cdot 10^7$	$-6,8 \cdot 10^8$	$4,2 \cdot 10^8$	$-5,8 \cdot 10^8$	$2,0 \cdot 10^9$	$-1,1 \cdot 10^9$	$5,9 \cdot 10^8$	$-1,7 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$-5,1 \cdot 10^8$
	<i>H</i>	$-1,7 \cdot 10^8$	$3,3 \cdot 10^9$	$-2,3 \cdot 10^9$	$2,8 \cdot 10^9$	$-9,3 \cdot 10^9$	$5,5 \cdot 10^9$	$-2,9 \cdot 10^9$	$7,9 \cdot 10^9$	$-7,3 \cdot 10^9$	$2,6 \cdot 10^9$
	<i>I</i>	$3,8 \cdot 10^8$	$-9,4 \cdot 10^9$	$7,3 \cdot 10^9$	$-8,1 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{10}$	$-2 \cdot 10^{10}$	$8,4 \cdot 10^9$	$-2 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$-7,4 \cdot 10^9$
	<i>J</i>	$-4 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{10}$	$-9,9 \cdot 10^9$	$10^{10}$	$-3 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$-1 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$	$-3 \cdot 10^{10}$	$9,5 \cdot 10^9$

Коэффициенты в (5)		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>J</i>
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Комбинированное опирание по контуру (рис. 1, е)											
Коэффициенты выражения (6)	<i>A</i>	0,3697	-2,811	-0,0722	-0,5475	11,16	-5,653	1,002	-8,173	5,373	-0,6206
	<i>B</i>	-36,84	305,8	-17,62	65,15	-1159	607,5	-116,6	857,8	-586,6	77,49
	<i>C</i>	1600	-14636	2073	-3394	52826	-28710	5954	-39540	28172	-4194
	<i>D</i>	-39756	404655	-91267	10 <sup>5</sup>	-1,4·10 <sup>6</sup>	7,8·10 <sup>5</sup>	-1,8·10 <sup>5</sup>	1,1·10 <sup>6</sup>	-7,8·10 <sup>5</sup>	1,3·10 <sup>5</sup>
	<i>E</i>	6,2·10 <sup>5</sup>	-7,1·10 <sup>6</sup>	2,2·10 <sup>6</sup>	-1,9·10 <sup>6</sup>	2,3·10 <sup>7</sup>	-1,4·10 <sup>7</sup>	3,3·10 <sup>6</sup>	-1,8·10 <sup>7</sup>	1,4·10 <sup>7</sup>	-2,5·10 <sup>6</sup>
	<i>F</i>	-6,3·10 <sup>6</sup>	8,3·10 <sup>7</sup>	-3,2·10 <sup>7</sup>	2,4·10 <sup>7</sup>	-2,5·10 <sup>8</sup>	1,6·10 <sup>8</sup>	-4,0·10 <sup>7</sup>	2,0·10 <sup>8</sup>	-1,6·10 <sup>8</sup>	3,2·10 <sup>7</sup>
	<i>G</i>	4,2·10 <sup>7</sup>	-6,4·10 <sup>8</sup>	3,0·10 <sup>8</sup>	-2,0·10 <sup>8</sup>	1,8·10 <sup>9</sup>	-1,2·10 <sup>9</sup>	3,2·10 <sup>8</sup>	-1,5·10 <sup>9</sup>	1,2·10 <sup>9</sup>	-2,7·10 <sup>8</sup>
	<i>H</i>	-1,7·10 <sup>8</sup>	3,1·10 <sup>9</sup>	-1,7·10 <sup>9</sup>	1,0·10 <sup>9</sup>	-8,5·10 <sup>9</sup>	5,7·10 <sup>9</sup>	-1,7·10 <sup>9</sup>	6,9·10 <sup>9</sup>	-6,1·10 <sup>9</sup>	1,4·10 <sup>9</sup>
	<i>I</i>	4,1·10 <sup>8</sup>	-8,8·10 <sup>9</sup>	5,5·10 <sup>9</sup>	-3,1·10 <sup>9</sup>	2·10 <sup>10</sup>	-2·10 <sup>10</sup>	4,9·10 <sup>9</sup>	-2·10 <sup>10</sup>	2·10 <sup>10</sup>	-4,2·10 <sup>9</sup>
	<i>J</i>	-4,1·10 <sup>8</sup>	10 <sup>10</sup>	-7,6·10 <sup>9</sup>	4,0·10 <sup>9</sup>	-3·10 <sup>10</sup>	2·10 <sup>10</sup>	-6,4·10 <sup>9</sup>	2·10 <sup>10</sup>	-2·10 <sup>10</sup>	5,6·10 <sup>9</sup>
Жесткое защемление по контуру (рис. 1, ж)											
Коэффициенты выражения (6)	<i>A</i>	0,2055	-3,233	1,658	-0,2016	6,912	-4,277	1,284	-6,020	5,494	-1,841
	<i>B</i>	-20,14	352,73	-197,96	22,73	-714,4	463,3	-142,9	632,8	-598,1	204,7
	<i>C</i>	857,5	-16932	10320	-1125	32389	-22076	6990	-29223	28646	-10008
	<i>D</i>	-20775	4,7·10 <sup>5</sup>	-3,1·10 <sup>5</sup>	32077	-8,5·10 <sup>5</sup>	6,1·10 <sup>5</sup>	-2,0·10 <sup>5</sup>	7,8·10 <sup>5</sup>	-7,9·10 <sup>5</sup>	2,8·10 <sup>5</sup>
	<i>E</i>	3,1·10 <sup>5</sup>	-8,3·10 <sup>6</sup>	5,8·10 <sup>6</sup>	-5,8·10 <sup>5</sup>	1,4·10 <sup>7</sup>	-1,1·10 <sup>7</sup>	3,5·10 <sup>6</sup>	-1,3·10 <sup>7</sup>	1,4·10 <sup>7</sup>	-5,1·10 <sup>6</sup>
	<i>F</i>	-3,1·10 <sup>6</sup>	9,7·10 <sup>7</sup>	-7,2·10 <sup>7</sup>	6,9·10 <sup>6</sup>	-1,5·10 <sup>8</sup>	1,2·10 <sup>8</sup>	-4,2·10 <sup>7</sup>	1,5·10 <sup>8</sup>	-1,6·10 <sup>8</sup>	6,0·10 <sup>7</sup>
	<i>G</i>	1,9·10 <sup>7</sup>	-7,4·10 <sup>8</sup>	5,9·10 <sup>8</sup>	-5,4·10 <sup>7</sup>	1,1·10 <sup>9</sup>	-9,4·10 <sup>8</sup>	3,3·10 <sup>8</sup>	-1,1·10 <sup>9</sup>	1,2·10 <sup>9</sup>	-4,7·10 <sup>8</sup>
	<i>H</i>	-7,5·10 <sup>7</sup>	3,7·10 <sup>9</sup>	-3,0·10 <sup>9</sup>	2,7·10 <sup>8</sup>	-5,1·10 <sup>9</sup>	4,6·10 <sup>9</sup>	-1,6·10 <sup>9</sup>	5,1·10 <sup>9</sup>	-6,1·10 <sup>9</sup>	2,3·10 <sup>9</sup>
	<i>I</i>	1,6·10 <sup>8</sup>	-1·10 <sup>10</sup>	9,1·10 <sup>9</sup>	-7,8·10 <sup>8</sup>	10 <sup>10</sup>	-1·10 <sup>10</sup>	4,7·10 <sup>9</sup>	-1·10 <sup>10</sup>	2·10 <sup>10</sup>	-6,7·10 <sup>9</sup>
	<i>J</i>	-1,3·10 <sup>8</sup>	10 <sup>10</sup>	-1·10 <sup>10</sup>	9,9·10 <sup>8</sup>	-2·10 <sup>10</sup>	2·10 <sup>10</sup>	-6,0·10 <sup>9</sup>	1,7·10 <sup>10</sup>	-2·10 <sup>10</sup>	8,5·10 <sup>9</sup>

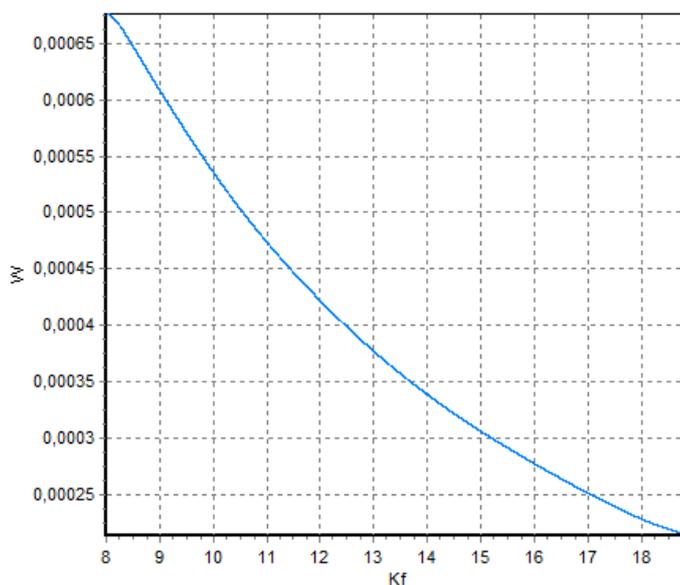


Рисунок 2 – График зависимости  $w_0 - K_f$  для ортотропных пластинок в виде ромбов при комбинированной схеме опирания (рис. 1) и соотношении цилиндрических жесткостей  $D_x/H=4,5; D_y/H=3$

Подставляя значения переменных коэффициентов  $A_{kl}, \dots, I_{kl}$  из таблицы 1 в выражение (6) и заменяя ими соответствующие коэффициенты в выражении (5), найдем значения функции  $f(K_f; D_x/H; D_y/H)$ . Умножив их на размерный множитель  $qA^2/H$ , получим значения максимальных прогибов для ортотропных пластинок в виде ромбов при однородных и комбинированных граничных условиях. Сравнение результатов, полученных с помощью предложенного способа, с результатами расчета по МКЭ показало, что погрешность решений по сравнению с последними не превышает 3,18%.

### Выводы

1. Построены аппроксимирующие функции для нахождения значений максимальных прогибов упругих ортотропных пластинок в виде ромбов при однородных и комбинированных граничных условиях, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой.

2. Полученные аппроксимирующие функции могут быть использованы для непосредственного расчета пластинок в виде ромбов и в качестве граничной кривой для выбора опорных решений при расчете параллелограммных пластинок с помощью методики МИКФ, а также для разработки программного комплекса, реализующего метод интерполяции по коэффициенту формы при расчете ортотропных пластинок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: АСВ, 1999. – 320 с.
2. Коробко, А.В. Расчет прямоугольных ортотропных пластинок с однородными граничными условиями методом интерполяции по коэффициенту формы [Текст] / А.В. Коробко, С.Ю. Савин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2011. – №1. – С. 11-15.
3. Коробко, В.И. Расчет треугольных ортотропных пластинок с однородными граничными условиями методом интерполяции по коэффициенту формы [Текст] / В.И. Коробко, С.Ю. Савин // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет-УНПК. – 2010. – №4(30) – С. 8-12.
4. Коробко, В.И. Изгиб ортотропных пластин в виде правильных многоугольников, шарнирно опертых по контуру [Текст] / В.И. Коробко, С.Ю. Савин // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет-УНПК. – 2011. – №1(33) – С. 3-11.
5. Коробко, В.И. Изгиб прямоугольных ортотропных пластинок с однородными и комбинированными граничными условиями [Текст] / В.И. Коробко, С.Ю. Савин // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет-УНПК. – 2011. – №5(37) – С. 33-38.
6. Коробко, В.И. Изгиб треугольных ортотропных пластинок с однородными и комбинированными граничными условиями [Текст] / В.И. Коробко, С.Ю. Савин, С.В. Бояркина // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет-УНПК. – 2012. – №1(39) – С. 7-12.

#### **Коробко Виктор Иванович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
Тел.: +7 (4862) 73-43-95  
E-mail: vikor10@mail.ru

#### **Савин Сергей Юрьевич**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
E-mail: sjs28@mail.ru

---

V.I. KOROBKO, S.JU. SAVIN

### **BENDING OF THE TRIANGULAR ORTHOTROPIC PLATE WITH HOMOGENEOUS AND COMBINED BOUNDARY CONDITIONS**

*The article describes the problem of transverse bending of elastic orthotropic plates in the form of rhombs, loaded with a evenly distributed load, with combined and with homogeneous boundary conditions. For these plates the values of the maximum deflection obtained by FEM to construct an approximating function whose arguments are the shape factor and the ratio of flexural rigidity. These functions can be directly used for finding of values of the maximum deflection of rhombic plates, or to obtain reference values for solving the problem of transverse bending of orthotropic plates in the form of parallelogram using the interpolation technique by shape factor.*

**Keywords:** *the triangular orthotropic plates, the maximum deflection, homogeneous and combined boundary conditions, the interpolation technique by shape factor.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Korobko, A.V. Geometricheskoe modelirovanie formy oblasti v dvumernyh zadachah teorii uprugosti [Tekst] / A.V. Korobko. – М.: ASV, 1999. – 320 s.

2. Korobko, A.V. Raschet prjamougol'nyh ortotropnyh plastinok s odnorodnymi granichnymi uslovijami metodom interpoljacji po kojefficientu formy [Tekst] / A.V. Korobko, S.Ju. Savin // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. – 2011. – №1. – S. 11-15.

3. Korobko, V.I. Raschet treugol'nyh ortotropnyh plastinok s odnorodnymi granichnymi uslovijami metodom interpoljacji po kojefficientu formy [Tekst] / V.I. Korobko, S.Ju. Savin // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2010. – №4(30) – S. 8-12.

4. Korobko, V.I. Izgib ortotropnyh plastin v vide pravil'nyh mnogougol'nikov, sharnirno opertyh po konturu [Tekst] / V.I. Korobko, S.Ju. Savin // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2011. – №1(33) – S. 3-11.

5. Korobko, V.I. Izgib prjamougol'nyh ortotropnyh plastinok s odnorodnymi i kombinirovannymi granichnymi uslovijami [Tekst] / V.I. Korobko, S.Ju. Savin // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2011. – №5(37) – S. 33-38.

6. Korobko, V.I. Izgib treugol'nyh ortotropnyh plastinok s odnorodnymi i kombinirovannymi granichnymi uslovijami [Tekst] / V.I. Korobko, S.Ju. Savin, S.V. Bojarkina // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2012. – №1(39) – S. 7-12.

**Korobko Viktor Ivanovich**

State university – educational-science-production complex, Orel

Doctor of technical science, professor of department «Construction structures and materials»

Tel.: +7 (4862) 73-43-95

E-mail: vikor10@mail.ru

**Savin Sergey Jurievich**

State university – educational-science-production complex, Orel

Post-graduate student of department «Construction structures and materials»

E-mail: sjs28@mail.ru

## РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ ПЕРЕМЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ МЕТОДОМ ПЕРЕМЕННОЙ КООРДИНАТЫ

*Предлагается вариант решения задачи о собственных колебаниях неоднородного стержня, который приводит к частотному уравнению. При решении задачи используется метод переменной координаты, аналогичный методу точного и приближенного решений некоторых автономных задач нелинейной механики – методу переменного масштаба. В итоге значительно снижается трудоемкость расчета продольных колебаний стержней. Составлена таблица значений частот продольных колебаний конического стержня.*

**Ключевые слова:** собственные колебания стержня, частотное уравнение, собственная частота.

При расчете продольных колебаний реальные конструкции часто моделируются стержнями с переменными по длине жесткостью и плотностью. При этом собственные частоты и формы рассчитываются последовательными приближениями, причем высшие частоты и формы определяются через низшие из условия ортогональности собственных форм.

I. В общем случае неоднородности уравнение свободных продольных колебаний стержня имеет вид:

$$U_{\xi\xi\xi} + f(\xi)U_{\xi\xi} - g(\xi)U_{\tau\tau} = 0. \quad (1)$$

Здесь  $(\ )_{\xi} = \frac{d}{d\xi}$ ;  $f = (\ln G)_{\xi}$ ;  $G = EF$ ;  $\tau = \frac{z}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho_{\min}}}$ ;  $U = \frac{u}{l}$ ;  $g = \frac{\rho}{\rho_{\min}}$ ;  $\xi = \frac{x}{l}$ ;  $u = u(x, t)$  – осевое смещение поперечного сечения;  $l$  – длина стержня;  $E = E(\xi)$  – модуль Юнга материала стержня;  $F = F(\xi)$  – площадь поперечного сечения;  $\rho = \rho(\xi)$  – плотность материала;  $x, t$  – осевая координата и время.

При выводе уравнения (1) предполагалось равномерное распределение напряжения по сечению и не учитывалось влияние сужения поперечного сечения.

Решение уравнения (1) должно удовлетворять граничным условиям:

$$\text{- для заземленных концов: } U(0, \tau) = U(l, \tau) = 0; \quad (2)$$

$$\text{- для консольного стержня (край } \xi = 1 \text{ свободен): } U(0, \tau), U_{\xi}(l, \tau) = 0. \quad (3)$$

$$\text{- для свободного стержня: } U_{\xi}(0, \tau) = U_{\xi}(l, \tau) = 0. \quad (4)$$

Для колебаний с периодом  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  полагаем:

$$U(\xi, \tau) = \Phi(\xi)e^{i\omega\tau}. \quad (5)$$

Здесь  $\Phi = \Phi(\xi)$  – форма собственных колебаний;  $\omega$  – круговая частота колебаний.

Разделяя переменные в уравнении (1) и граничных условиях, получаем задачу:

$$\Phi_{\xi\xi\xi} + f\Phi_{\xi\xi} + \omega^2 g\Phi = 0 \quad (6)$$

$$\text{и } \Phi(0) = \Phi(1) = 0, \quad (7)$$

$$\text{или } \Phi(0) = 0, \quad \Phi_{\xi}(1) = 0, \quad (8)$$

$$\text{или } \Phi_{\xi}(0) = \Phi_{\xi}(1) = 0. \quad (9)$$

За исключением немногочисленных частных случаев [3] решения уравнения типа (6) неизвестны. Для решения уравнения (6) с произвольными переменными коэффициентами используем метод переменной координаты, аналогичный методу, применяемому в работе [2].

Приведем уравнение (6) к виду:

$$\Psi_{\eta\eta} + \Psi = 0, \quad (10)$$

$$\text{где } \Psi(\eta) = \Phi(\xi)A(\xi); \eta = \eta(\xi). \quad (11)$$

Вновь введенные функции  $A = A(\xi)$  и  $\eta = \eta(\xi)$  есть решение системы уравнений:

$$\eta_{\xi}^2 + \frac{A_{\xi} \eta_{\xi\xi}}{A \eta_{\xi\xi}} - \frac{A_{\xi\xi}}{A} = \omega^2 g; \quad (12)$$

$$2 \frac{A_{\xi}}{A} = \frac{\eta_{\xi\xi}}{\eta_{\xi}} + f. \quad (13)$$

Полагая далее:

$$\frac{1}{\eta_{\xi}^2} \begin{pmatrix} A_{\xi} \eta_{\xi\xi} & A_{\xi\xi} \\ A \eta_{\xi} & A \end{pmatrix} \ll 1, \quad (14)$$

находим приближенное решение систем (12), (13):

$$\eta = \omega \int_0^{\xi} g^{0,5} d\alpha; \quad (15)$$

$$A = (\omega G g^{0,5})^{0,5}. \quad (16)$$

Учитывая (15) и (16), записываем условие (14) в виде:

$$\frac{1}{2\omega^2 g} = \left[ 0,5 \left( \frac{G_{\xi}}{G} \right)^2 - \frac{G_{\xi\xi}}{G} + 0,625 \left( \frac{\rho_{\xi}}{\rho} \right)^2 - 0,5 \frac{\rho_{\xi\xi}}{\rho} + \frac{G_{\xi} \rho_{\xi}}{G \rho} \right] \ll 1. \quad (17)$$

Решение уравнения (10) известно:

$$\Psi = C_1 \cos \eta + C_2 \sin \eta \quad (18)$$

$$\text{и } \Phi = A^{-1} (C_1 \cos \eta + C_2 \sin \eta). \quad (19)$$

Постоянные  $C_1$  и  $C_2$  определяются из следующих граничных условий:

1. Оба края зашпелены. Из условий уравнения (7) получаем формулы для  $n$ -й собственной частоты и соответствующей ей формы колебаний:

$$\omega_n = n\pi \left( \int_0^1 g^{0,5} d\xi \right)^{-1}; \quad (20)$$

$$\Phi_n = C_{2n} A_n^{-1} \sin \omega_n \int_0^{\xi} g^{0,5} d\alpha. \quad (21)$$

2. Один край ( $\xi = 0$ ) зашпелен, второй ( $\xi = 1$ ) свободен. В этом случае частоты определяются выражением:

$$\omega_n = \left[ (n-1)\pi + \arctg \frac{k_2(1)}{k_2(0)} \right] \left( \int_0^1 g^{0,5} d\xi \right)^{-1}. \quad (22)$$

$$\text{Здесь } k_1(z) = 0,5 [f(z) g^{0,5}(z)] \left[ \frac{f_2(z)}{f(z)} + 0,5 \frac{g_2(z)}{g(z)} \right]; \quad (23)$$

$$k_2(z) = [g^{0,5}(z) f^{-1}(z)]^{0,5}. \quad (24)$$

Формы колебаний те же, что и в первом случае.

3. Стержень свободный. Условия уравнения (9) дают формулу для собственных частот:

$$\omega_n = (n\pi + \arctg k) \left( \int_0^1 g^{0,5} d\xi \right)^{-1}, \quad (25)$$

$$\text{где } k = \frac{k_2(0)k_2(1) - k_2(0)k_2(1)}{k_2(0)k_2(1) + k_2(0)k_2(1)}.$$

В случае  $F = const$  и  $g = const$  частоты уравнений (20), (22), (25) обращаются в частоты соответствующим образом закрепленного однородного стержня [1]. Как следует из формулы (22) и (25), при таком закреплении стержня частоты колебаний образуют гармонический ряд.

II. Расчет собственных частот и форм колебаний конкретных стержней с известными законами изменения  $E$ ,  $F$  и  $\rho$  производится по соответствующим формулам при условии выполнения неравенства (17). Решения, полученные таким образом, будут приближенными. Укажем класс стержней, для которых предлагаемый метод дает точное решение. Это стержни, у которых закон изменения геометрических и механических характеристик удовлетворяет уравнению (17):

$$0,5 \left( \frac{G_{\xi}}{G} \right)^2 - \frac{G_{\xi\xi}}{G} + 0,625 \left( \frac{\rho_{\xi}}{\rho} \right)^2 - 0,5 \frac{\rho_{\xi\xi}}{\rho} + \frac{G_{\xi} \rho_{\xi}}{G \rho} = 0. \quad (26)$$

Предположим, что характеристики материала стержня ( $E$  и  $\rho$ ) постоянны, тогда площадь поперечного сечения стержня определяется из уравнения:

$$\left( \frac{F_{\xi}}{F} \right)^2 - 2 \frac{F_{\xi\xi}}{F} = 0. \quad (27)$$

$$\text{Откуда } F = \frac{1}{4} (D_1 \xi + D_2)^2. \quad (28)$$

Условию (28) удовлетворяет, например, сплошной конический стержень.

В таблице приведены значения первых двух частот конического стержня для нескольких значений параметра конусности:

$$\alpha = \frac{r_0}{r_k}; m = \frac{r_0}{l}; n = \frac{r_0}{l}, \text{ где } r_0 \text{ и } r_k - \text{ радиусы концевых сечений стержня.}$$

Значения частот продольных колебаний конического стержня представлены в таблице 1:

Таблица 1 – Частоты продольных колебаний конического стержня

$\alpha$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_1$	$\omega_2$
0,5	3,46	6,6	2,35	5,49
1	3,14	6,28	1,57	4,71
1,5	3,28	6,42	1,25	4,35
2	3,46	6,6	1,11	4,25

Как показывают результаты, для свободных стержней изменения частоты по сравнению с частотой стержня постоянного сечения ( $\alpha = 1$ ) незначительно.

Частоты консольного стержня существенно зависят от величины конусности. Кроме того, частота зависит от условий заделки. Стержень, заделанный широким концом ( $\alpha = 0,5$ ), имеет частоту, значительно превышающую частоту колебаний такого же стержня, но заделанного узким концом ( $\alpha = 2$ ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний [Текст] / В.Л. Бидерман. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
2. Бондарь, Н.Г. Некоторые автономные задачи нелинейной механики [Текст] / Н.Г. Бондарь. – Киев: «Наукова думка», 1969. – 302 с.
3. Камке, Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям [Текст] / Э.Камке. – М.: Наука. – 1976, 6 изд. – 571 с.

#### Потураева Татьяна Вячеславовна

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика»

Тел.: +7 (4862) 76 03 58

E-mail: tanpo77@mail.ru

#### Брума Екатерина Владимировна

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

Аспирант кафедры «Строительные конструкции и материалы»

Тел.: +7 (4862) 76 03 67

E-mail: mam4ikk@mail.ru

T.V. POTURAEVA, E.V. BROOMA

### SOLUTION OF DIFFERENTIAL EQUATIONS OF ARBITRARY GOVERNMENTAL VARIABLE COEFFICIENTS BY VARIABLE COORDINATES

*The version of the solution of a task about own fluctuations of a non-uniform core which leads to the frequency equation is offered. At the solution of a task the method of variable coordinate similar to a method of exact and approximate solutions of some independent problems of nonlinear mechanics - to a method of variable scale is used. As a result labor input of calculation of longitudinal fluctuations of cores considerably decreases. The table of values of frequencies of longitudinal fluctuations of a conic core is made.*

*Keywords: natural oscillations of the rod, the frequency equation, the natural frequency.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Biderman, V.L. Teorija mehanicheskikh kolebanij [Tekst] / V.L. Biderman. – M.: Vysshaja shkola, 1980. – 408 s.
2. Bondar', N.G. Nekotorye avtonomnye zadachi nelinejnoj mehaniki [Tekst] / N.G. Bondar'. – Kiev: «Naukova dumka», 1969. – 302 s.
3. Kamke, Je. Spravochnik po obyknovennym differencial'nym uravnenijam [Tekst] / Je. Kamke. – M.: Nauka. – 1976, 6 izd. – 571 s.

**Poturaeva Tatiana Vyacheslavovna**

State university – educational-science-production complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department «Higher mathematics»

Ph.: +7 (4862) 76 03 58

E-mail: tanpo77@mail.ru

**Brooma Ekaterina Vladimirovna**

State university – educational-science-production complex, Orel

Post-graduate student of department «Building designs and materials»

Ph.: +7 (4862) 76 03 67

E-mail: mam4ikk@mail.ru

УДК 629

СТАВСКАЯ И.С., МАРКОВ С.В., МОРОЗОВА О.В.

## ПРОДОЛЬНЫЕ ТРЕЩИНЫ В ЗАЩИТНОМ СЛОЕ БЕТОНА В УСЛОВИЯХ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

*Формулируется метод оценки условий образования продольных трещин железобетонных элементов в зависимости от характера армирования, особенностей коррозионных повреждений бетона и арматуры. Установлена значимость влияния толщины защитного слоя, уровня коррозионных повреждений бетона и арматуры, прочностных и деформативных качеств обоих материалов.*

**Ключевые слова:** арматура, бетон, продольные трещины, коррозионные повреждения бетона и арматуры.

В настоящее время исследованиями коррозии арматуры в бетоне уделяется большое внимание. Тем не менее, изучение последних публикаций Н.В. Савицкого, И.Н. Матюшенко, С.Е. Шехоркина, А.И. Васильева, С.Н. Леонович, А.В. Бенина, Н.И. Невзорова [2, 5, 6] и проектов вновь вводимых стандартов по бетону (BS8500 и EN206) свидетельствует о том, что современное состояние науки о процессах коррозии, об их воздействии на сопротивление конструкции нуждаются в совершенствовании.

Воздействие коррозии арматуры на снижение сопротивления конструкции определяется комплексом факторов. Для железобетонных конструкций с трещинами, возникшими в результате нагружения, при проникновении агрессивной среды происходит коррозия арматуры.

В настоящей работе оценивается взаимосвязь между уровнем нагружения, характером армирования и влиянием коррозионного повреждения на образование продольных трещин в защитном слое бетона изгибаемого железобетонного элемента.

В работах [2, 5, 6] одним из условий проектирования железобетонных конструкций является защита арматуры от коррозии. Вместе с тем, необходимы исследования влияния общего уровня напряженно-деформированного состояния элемента и влияния коррозионных повреждений сжатого и растянутого бетона на появления продольных трещин.

В связи с этим предлагается продолжить рассмотрение соответствующей задачи с дополнительным учетом влияния уровня коррозионного повреждения растянутой и сжатой зоны сечения, уровня силового состояния растянутой и сжатой зоны.

Изложенное позволяет очертить рамки намеченного исследования, предложить достаточную для него совокупность гипотез и построить расчетную модель задачи.

Таким образом:

1. Влияние коррозионных повреждений бетона и арматуры зависят от уровня напряженно-деформированного состояния в каждом конкретном сечении [1].
2. Влияние продуктов коррозии металла на защитный слой определяется фактором стеснения роста объема накопленных коррозионных повреждений.
3. Расчетная модель принимается в виде полого цилиндра, толщина стенок которого равна минимальной толщине защитного слоя (опасного сечения кольца).
4. В интересах оценки процесса коррозионных повреждений вводится уравнение состояния силового сопротивления [1].

Продольные трещины появляются, как правило, в околоарматурных зонах, расположенных между поперечными трещинами (рис. 1) [4].

Причиной возникновения продольной трещины является образование на поверхности арматурного стержня продуктов коррозии железа, объем которых в 2-3 раза превышает объем

прокорродировавшего металла. Продукты коррозии тем самым создают давление на бетон, и чем тоньше защитный слой бетона, тем скорее он начнет разрушаться [2].



Рисунок 1 – Продольные трещины

Внутреннее давление продуктов коррозии арматуры  $P$  на защитный слой бетона считается пропорциональным разнице между объемом коррозионных продуктов свободно лежащей арматуры  $V_0$  и соответственно величине объема коррозионных продуктов стесненных защитным слоем бетона  $V_{ст}$ :

$$P = a \Delta V, \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент пропорциональности;  $\Delta V = V - V_{ст}$ , причем величина  $\Delta V_p$  постепенно возрастает во времени, а скорость образования продукта коррозии во времени уменьшается в соответствии с уменьшением поверхности расчетного сохранившегося сечения арматуры и стабилизируется продвижение коррозии (рис. 2).

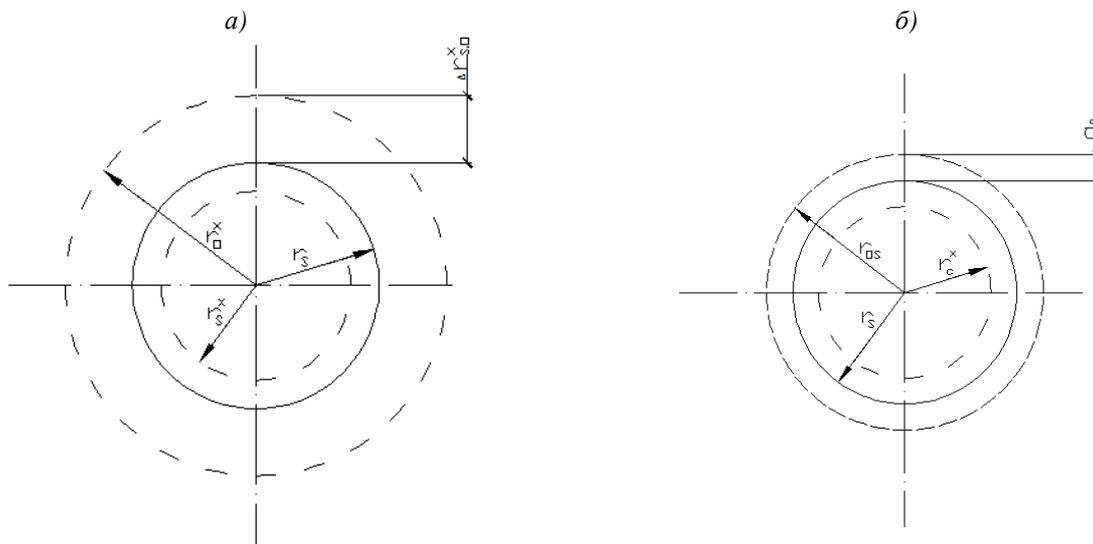


Рисунок 2 – Свободный арматурный стержень вне бетона (а):

$r_s$  – исходный радиус неповрежденного арматурного стержня;

$r_s^x$  – расчетный радиус поврежденного коррозией арматурного стержня;

$r_s^x$  – радиус поврежденного коррозией стержня при свободном развитии коррозии;

арматурный стержень в бетоне ж/б элемента (б):

$r_s$  – исходный радиус неповрежденного арматурного стержня – внутри;

$r_s^x$  – расчетный радиус сохранившейся части сечения арматуры;

$r_{os}$  – внешний радиус защитного цилиндра

$$r_{os} = r_s + a_s, \tag{2}$$

$a_s$  – толщина защитного слоя бетона в железобетонном элементе.

$$\Delta r_{os} = r_{o0}^x - r_s^x, \tag{3}$$

где  $\Delta r_{so}$  – толщина продуктов коррозии свободно лежащей арматуры.

$$\Delta r_o^x = r_s^x - r_{so}^x, \tag{4}$$

где  $\Delta r_o^x$  – толщина продуктов коррозии арматуры внутри бетонного элемента.

$$\Delta r = \Delta r_{os} - \Delta r_o^x, \tag{5}$$

где  $\Delta r$  – относительная величина стеснения.

$$\epsilon_{кор} = \frac{\Delta r}{\Delta r_{os}}, \tag{6}$$

(6)

где  $\epsilon_{кор}$  – аналитическая величина деформации стеснения.

Внутреннее давление продуктов коррозии арматуры  $P$  на защитный слой бетона считаем по формуле (1):

$$P = \epsilon_{кор} E_{кор}, \tag{7}$$

где  $\epsilon_{кор} = a$ ;  $E_{кор}$  – экспериментальный модуль деформаций продуктов коррозии арматуры.

Экспериментальный модуль деформаций продуктов коррозии арматуры зависит от плотности коррозии, в стесненном состоянии зависит от уровня обжата продукта коррозии, меняется с течением времени. Данный вопрос не изучен в полной мере, поэтому давление продуктов коррозии на окружающий бетон определяется по [2] как радиальные давления по формуле:

$$P_{кр} = \frac{2 E_{вр} \Delta r_o^x}{(D + 2 a_s) \left( \frac{r_{os}^2 + r_s^2}{r_{os}^2 - r_s^2} + \nu_c \right)}, \tag{8}$$

где  $\nu_c$  – коэффициент Пуассона для бетона;  $E_{вр}$  – модуль временной деформации бетона, определяемый по формуле [7]:

$$E_{вр} = E_{мгн} / (1 + \varphi), \tag{9}$$

где  $E_{мгн}$  – модуль мгновенной деформации бетона;  $\varphi$  – коэффициент бетона, вычисляется по строительным правилам (СП табл. 5.5);  $\Delta r_o^x$  – слой продуктов коррозии, оказывающий давление на бетон.

$$\varphi = E_{мгн} * C(t, t_0), \tag{10}$$

где  $C(t, t_0)$  – простая ползучесть.

Как было сказано ранее, расчетная модель принимается в виде полого цилиндра, нагруженного внутренним давлением, толщина стенок которого равна минимальной толщине защитного слоя (задача Ламе) [3].

Следуя решению задачи Ламе, рассмотрим однородное тело цилиндрической формы, нагруженное так, что внешняя нагрузка является асимметричной и вдоль оси цилиндра не меняется. Размеры цилиндра могут быть произвольными, и на соотношение между внутренним и наружным радиусами цилиндра ограничений накладывать не будем. Длину цилиндра пока также будем считать произвольной. Каждая точка цилиндра при его деформации получит перемещения. По условиям симметрии эти перемещения, очевидно, будут происходить в радиальных плоскостях. Точка может перемещаться по направлению радиуса и вдоль соответствующей образующей [3].

Обозначим через  $e_r$  и  $e_t$  относительные удлинения в цилиндре в радиальном и окружном направлениях и выразим их через перемещение и [3].

Для этого рассмотрим элементарный отрезок  $AB = dr$ , выделенный в радиальном направлении (рис. 3), до и после нагружения цилиндра. Точка А получает перемещение  $u$ , а точка В – перемещение  $u + du$ . Легко установить, что новая длина элемента будет равна  $dr + du$ , а его относительное удлинение [3]:

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr}. \tag{11}$$

Рассмотрим далее длину окружности, проведенной внутри цилиндра до и после его нагружения (рис. 4). Длина окружности до нагружения цилиндра равна  $2\pi r$ . После нагружения

радиус увеличится на  $u$  и длина окружности будет равна  $2\pi(r+u)$ . Относительное удлинение ее составит [3]:

$$\varepsilon_t = \frac{2\pi(r+u) - 2\pi r}{2\pi r} \text{ или } \varepsilon_t = u/r. \quad (12)$$

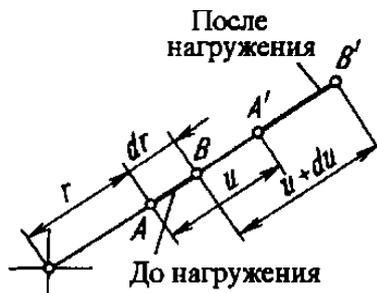


Рисунок 3 – элементарный отрезок  $AB = dr$ , выделенный в радиальном направлении

Исключая  $u$  из равенств (11) и (12), получаем:

$$\frac{d}{dr} (\varepsilon_t r) - \varepsilon_r = 0. \quad (13)$$

Выделим из цилиндра элемент в форме криволинейного шестигранника (рис. 5). Длины сторон этого элемента равны  $dr, dz, d\varphi, r$  [3].



Рисунок 4 – Длина окружности, проведенной внутри цилиндра до и после его нагружения (до и после повреждения арматуры коррозией)

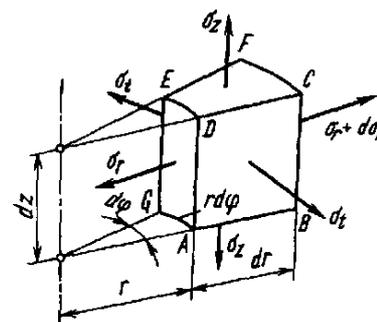


Рисунок 5 – Элемент в форме криволинейного шестигранника

В осевых сечениях цилиндра (плоскость  $ABCD$  элемента) по условиям осевой симметрии касательные напряжения отсутствуют и сохраняются только нормальные напряжения.

Основанием этому служит условие независимости перемещений  $u$  от координаты  $r$ . В поперечных сечениях могут существовать нормальные (осевые) напряжения  $\sigma_r$ , которые возникают вдоль оси. Эти напряжения предполагаются неизменными в пределах выделенного шестигранного элемента [3].

Поскольку площадки  $ABCD$  и  $CDEF$  являются главными, главной будет также и площадка  $ADEG$ . Напряжение на этой площадке обозначим через  $\sigma_r$ . Оно называется *радиальным* напряжением. При переходе от радиуса  $r$  к радиусу  $r + dr$  напряжение  $\sigma_r$  получит приращение  $d\sigma_r$  [3].

В рассматриваемой постановке, как видим, задачу определения напряжений и перемещений в теле вращения можно решить в функции только одного независимого переменного – радиуса  $r$ .

Проецируя силы, действующие на элемент, на направление радиуса, получаем следующее условие равновесия [3]:

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\varphi dz - \sigma_r r d\varphi dz - \sigma_z dr dz d\varphi = 0; \quad (14)$$

$$\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} r - \sigma_z = 0;$$

$$\frac{d}{dr} (\sigma_r r) - \sigma_z = 0.$$

Остальные уравнения равновесия для элемента удовлетворяются тождественно. Со-

гласно обобщенному закону Гука, напряжения  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$ ,  $\sigma_z$  связаны с удлинениями  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_t$  следующими соотношениями [3]:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_t + \sigma_z)]; \quad \varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \mu(\sigma_r + \sigma_z)]. \quad (15)$$

Перемещение можно найти из выражения (12), если  $\varepsilon_t$  предварительно определить по (15):

$$u = \frac{2}{E} \left[ A(1 - \mu)r + B(1 + \mu)\frac{1}{r} - \mu\sigma_z r \right]. \quad (16)$$

Внутренний радиус цилиндра равен  $a$ , внешний радиус цилиндра –  $b$  (рис. 6).

Для решения воспользуемся формулами напряжений, полученными из общего решения асимметричной задачи в перемещениях (рис. 7) [3]:

$$G_t = P \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right), \quad (17)$$

где  $a = r_s$ ;  $b = r_s + a_s$ ;  $a_s$  – защитный слой бетона .

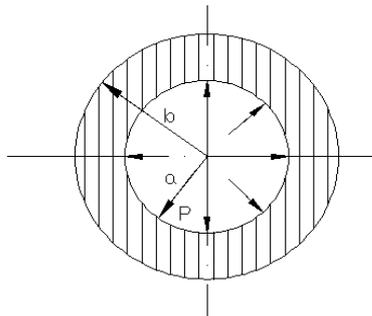


Рисунок 6 – Задача Ламе

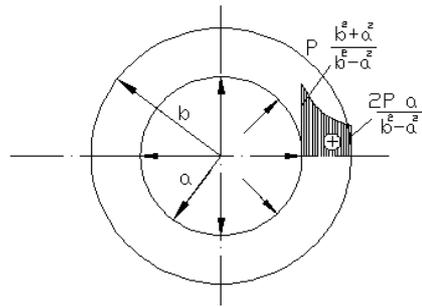


Рисунок 7 – Эпюры при внутреннем давлении, эпюра  $G_t$

Откуда фибровые растягивающие напряжения [3]:

$$G_{t,c} = P \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} = P \frac{(r_s + a_s)^2 + r_s^2}{(r_s + a_s)^2 - r_s^2} = P \frac{2r_s^2 + 2a_s r_s + a_s^2}{2a_s r_s + a_s^2}, \quad (18)$$

$$G_{t,b} = P \frac{2a^2}{b^2 - a^2} = P \frac{2r_s^2}{(r_s + a_s)^2 - r_s^2} = P \frac{2r_s^2}{2a_s r_s + a_s^2}. \quad (19)$$

Расчетная ширина кольца из цилиндра  $C=1$ . Суммарное усилие растяжения в защитном бетонном цилиндре:

$$F_t = C \int_a^b P \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right) dr = PC \frac{a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right) dr = PC \frac{a(b-a)(b+a)}{(b^2 - a^2)} \quad (20)$$

или

$$F_t = PC \frac{a_s r_s (2r_s + a_s)}{(2r_s^2 + 2a_s r_s + a_s^2)}. \quad (21)$$

Общее силовое сопротивление бетонного защитного цилиндра:

$$F_{R,t} = C a_s R_{bt}, \quad (22)$$

где  $R_{bt}$  – прочность бетона.

Таким образом,  $\max P$ , без образования продольных трещин находится из условия  $F_t = F_{R,t}$ .

$$\max P = \frac{(2r_s^2 + 2a_s r_s + a_s^2)}{r_s (2r_s + a_s)} R_{bt}^*, \quad (23)$$

где  $R_{bt}^*$  зависит от коррозии бетона и от НДС (напряжения при двухосном растяжении снижаются).

$$R_{bt}^* = K^* R_{bt}, \quad (24)$$

где  $K^*$  – функция повреждений, представляемая в виде полинома 2-й степени (рис. 8) [1]:

$$K^* = \sum_{i=0}^2 a_i z^i; \quad \frac{dK^*}{dz} = \sum_{i=0}^2 i a_i z^{i-1}; \quad 0 \leq K^* \leq 1; \quad (25)$$

$$a_0 = 1 - \left( \frac{p}{\delta} \right)^2; \quad a_1 = \frac{2p}{\delta^2}; \quad a_2 = -\frac{1}{\delta^2},$$

где  $p$  – толщина неповрежденного коррозией части сжатого бетона сечения, т.к.  $a_0$ ,  $a_1$  зависит лишь от геометрических условий, утверждается одинаковое влияние коррозионных повреждений на все механические характеристики силового сопротивления.

Следует заметить, что (8) и (23) должны удовлетворять требованию:

$$P_{\text{фак}} < \max P,$$

(26)

где  $\max P$  вычисляем по формуле (23).

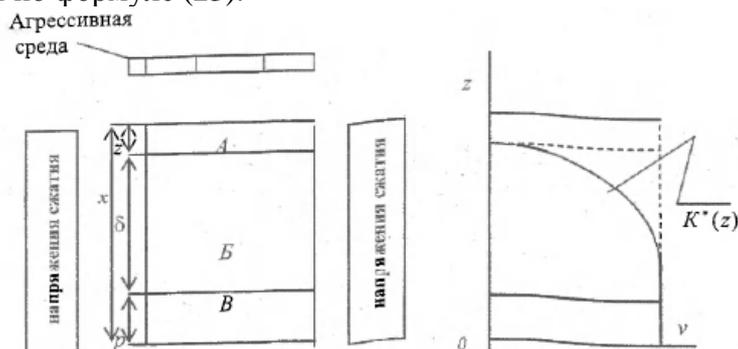


Рисунок 8 – Схема накопления коррозионных повреждений:  
 А – зона полного коррозионного разрушения бетона  $z$ ;  
 Б – зона частичного коррозионного повреждения бетона  $S$ ;  
 В – зона неповрежденного материала  $p$

Считаем, что давление продуктов коррозии арматуры  $P_{\text{кр}}$  на защитный слой бетона пропорционально объему коррозионных повреждений, причем величина  $\Delta V$  постепенно возрастает во времени, а скорость образования продукта коррозии во времени уменьшается в соответствии с уменьшением поверхности расчетного сохранившегося сечения арматуры и стабилизируется продвижение коррозии, таким образом, вводим уравнение состояния силового сопротивления [1]:

$$\frac{d(\Delta V)}{dt} = \alpha (\Delta V)^m, \quad (27)$$

где  $\Delta V = \frac{V - V_{\text{yc}}}{V_{\text{yc}}}$ , при  $m \gg 1$ .

$$\frac{d(\Delta V)}{(\Delta V)^m} = \alpha dt, \quad \text{где } m=1,$$

где  $V$  – объем продукта коррозии арматуры;  $V_{\text{yc}}$  – некоторое конечное значение объема продуктов коррозии арматуры,  $\alpha, m$  – параметры кинетики повреждений, зависящие от уровня напряженного состояния материала.

$$v_{\text{yc}} = c\beta c_0 t \text{ или } v_{\text{yc}} = (1 - e^{-\alpha t}) \max V, \quad (28)$$

где  $\max V$  – переход всего металла в коррозию.

$$v = 2\pi (r_2 - r_1^2) c, \text{ отсюда } dv = cs(t) dt, \quad (29)$$

$s$  – окружность;  $c$  – расчетная ширина цилиндра  $c=1$ .

$$v = c \int_0^t s(t) dt. \quad (30)$$

условие  $s_{\text{расч}} = \beta_{\text{кр}} s_0$ ;  $\beta_{\text{кр}}$  – эмпирический коэффициент, где  $s_0 = 2\pi r_2$ . (31)

$$P_{\text{фак}} = (1 - e^{-\alpha t}) P_{\text{кр}} < \max P; \quad (32)$$

где  $P_{\text{кр}}$  вычисляем по формуле (8).

Таким образом, осуществлено исследование особенностей совместной работы продольной арматуры и бетона в изгибаемом железобетонном элементе в условиях коррозионного повреждения бетона.

Построен расчетный аппарат определения момента образования продольной трещины в зависимости от класса и качества бетона и характеристик коррозии арматуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко, В.М. Феноменология кинетики повреждений бетона железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивной среде [Текст] / В.М. Бондаренко // Бетон и железобетон. – 2008. – №2.
2. Савицкий, Н.В. Моделирование воздействия продуктов коррозии арматуры на бетон защитного слоя [Текст] / Н.В. Савицкий, И.Н. Матюшенко, Л.М. Лаухина // Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры. – Днепропетровск, 2010.

3. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов [Текст] / В.И. Феодосьев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 280 с.
4. Бондаренко, В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона [Текст] / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов. – М.: АСВ, 2004.
5. Васильев, А.И. Оценка коррозионного износа рабочей арматуры в балках пролетных строений автодорожных мостов [Текст] / А.И. Васильев // Бетон и железобетон. – 2000. – №2. – С. 20-23.
6. Бенин, А.В. Приближенный метод оценки степени коррозионного износа арматуры по ширине раскрытия поверхностной трещины [Текст] / А.В. Бенин, Н.И. Невзоров // Электронный журнал «Весь бетон», 2008.
7. Бондаренко, В.М. Элементы теории реконструкции железобетона [Текст] / В.М. Бондаренко, А.В. Боровских, С.В. Марков, В.И. Римшин. – М., 2002.

**Ставская И.С.**

Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства, г. Москва  
Аспирант  
E-mail: oantc@ostu.ru

**Марков С.В.**

Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства, г. Москва  
Кандидат технических наук, доцент

**Морозова О.В.**

Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства, г. Москва  
Аспирант

---

I.S. STAVSKAJA, S.V. MARKOV, O.V. MOROZOVA

**LONGITUDINAL CRACKS IN THE PROTECTIVE LAYER  
OF CONCRETE IN THE CONDITIONS OF CORROSION DAMAGES**

*Development of a new method for estimation of crack appearing conditions in reinforced concrete elements depending on the character of reinforcement and corrosion damage of concrete and re-bars. The study evaluated the significance of concrete cover thickness, concrete and rebar corrosion damage rate, stress-strain features of both materials.*

**Keywords:** fittings, concrete, longitudinal cracks, corrosion damages of concrete and fittings.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Bondarenko, V.M. Fenomenologija kinetiki povrezhdenij betona zhelezobetonnyh konstrukcij, jekspluatiruemyh v agressivnoj srede [Текст] / V.M. Bondarenko // Бетон и железобетон. – 2008. – №2.
2. Savickij, N.V. Modelirovanie vozdeystvija produktov korrozii armatury na beton zawitnogo sloja [Текст] / N.V. Savickij, I.N. Matjushenko, L.M. Lauhina // Pridneprovskaja gosudarstvennaja akademija stroitel'stva i arhitektury. – Dnepropetrovsk, 2010.
3. Feodos'ev, V.I. Soprotivlenie materialov [Текст] / V.I. Feodos'ev. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 280 с.
4. Bondarenko, V.M. Raschetnye modeli silovogo soprotivlenija zhelezobetona [Текст] / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov. – М.: АСВ, 2004.
5. Vasil'ev, A.I. Ocenka korrozionnogo iznosa rabochej armatury v balkah proletnyh stroenij avtodorozhnyh mostov [Текст] / A.I. Vasil'ev // Бетон и железобетон. – 2000. – №2. – С. 20-23.
6. Benin, A.V. Priblizhennyj metod ocenki stepeni korrozionnogo iznosa armatury po shirine raskrytija poverhnostnoj treviny [Текст] / A.V. Benin, N.I. Nevzorov // Jelektronnyj zhurnal «Ves' beton», 2008.
7. Bondarenko, V.M. Jelementy teorii rekonstrukcii zhelezobetona [Текст] / V.M. Bondarenko, A.V. Borovskih, S.V. Markov, V.I. Rimshin. – М., 2002.

**Stavskaja I.S.**

Moscow state academy of municipal services and construction, Moscow  
Post-graduate student  
E-mail: oantc@ostu.ru

**Markov S.V.**

Moscow state academy of municipal services and construction, Moscow

Candidate of technical sciences, associate professor

**Morozova O.V.**

Moscow state academy of municipal services and construction, Moscow

Post-graduate student

УДК 691.322:621.21:620.3

ЛУКУТЦОВА Н.П., ПЫКИН А.А., ШИРКО С.В., МАЦАЕНКО А.А.

### **ТЕХНИКО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМОДИФИКАТОРА ДЛЯ БЕТОНА**

*Представлены результаты исследований влияния углерод-кремнеземистого наномодификатора, синтезированного способом ультразвукового диспергирования из отсевов дробления шунгитосодержащих пород III вида Зажогинского месторождения (Карелия), на свойства цементного камня и мелкозернистого бетона. Обоснована экологическая безопасность технологии получения данного наномодификатора.*

**Ключевые слова:** шунгитосодержащие породы, ультразвуковое диспергирование, углерод-кремнеземистый наномодификатор, цементный камень, мелкозернистый бетон, экологическая безопасность.

В настоящее время большинство технологий получения нанодисперсных веществ характеризуется повышенной долей риска в обеспечении человеческой и экологической безопасности, обусловленной необходимостью применения высоких давлений, плазмы, дугового разряда, высокотоксичных реактивов (толуола, изопропанола, элитеноксидов, сильных кислот и др.) с многостадийной химической очисткой. При этом одним из опасных факторов для здоровья рабочего персонала является появление воздушных взвесей наночастиц как побочного продукта их производства. По данным ряда исследований попадание взвешенных наночастиц в организм человека может привести к воспалению легочной ткани, поражению сердечно-сосудистой системы, печени и почек [1].

Поэтому важнейшим объектом исследования при оценке экологического риска, связанного с развитием нанотехнологий в строительной индустрии, энергетике, электронике, биотехнологиях, авиакосмической технике, приборостроении и других отраслях промышленности, является степень потенциальной опасности наноматериалов для здоровья человека и окружающей среды как в процессе их получения, так и при непосредственном применении.

Целью работы является исследование эффективности углерод-кремнеземистого наномодификатора (УКН-модификатора) для мелкозернистого бетона и оценка экологической безопасности технологии его получения.

В качестве основного сырья для получения УКН-модификатора использовались отсевы дробления шунгитосодержащих пород (ОДШСП) III вида с содержанием углерода 29,8% и диоксида кремния 56,2%.

Характерной особенностью шунгитосодержащих пород является их двухкаркасная структура. В каркасе, образованном достаточно равномерно распределенными минеральными кристаллическими частицами с преобладанием кремнезема  $\text{SiO}_2$  размерами от 1-2 до 10-12 мкм, расположена матрица из фуллереноподобных глобул углерода с размерами 10-20 нм [2].

Несмотря на отсутствие химических связей между кремнеземом и углеродом, в составе пород они представляют собой две взаимопроникающие фазы с контактной поверхностью около  $20 \text{ м}^2/\text{г}$  и не разделяются даже при диспергировании до размеров 1 мкм.

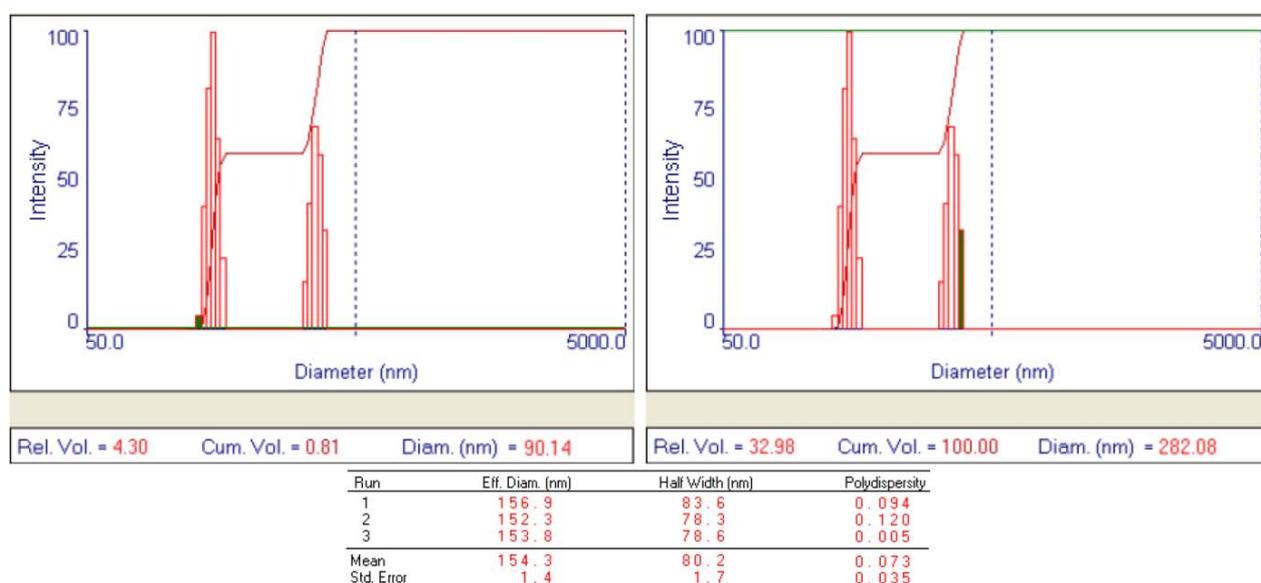
Биполярная углерод-кремнеземистая структура шунгитосодержащих пород обуславливает проявление у них высоких показателей по прочности, плотности, твердости, стойкости к истиранию, удару и воздействию сильноагрессивных сред, адсорбционной активности, антибактерицидности, а также теплопроводности и способности проводить электрический ток, экранировать или поглощать вредные высокочастотные, сверхвысокочастотные электромагнитные и геомагнитные излучения [3].

Известно, что наличие гидрофобной углеродной пленки на поверхности кремнезема в структуре шунгитосодержащих частиц приводит к сегрегации шунгитового микронаполнителя и цементных частиц, а ее сорбирующие свойства способствуют формированию структуры порового пространства, не заполненного твердой фазой новообразований цементного камня [4].

В основу получения УКН-модификатора положены принципы технологии «сверху вниз», связанные с уменьшением размеров применяемого сырья вплоть до наноразмеров при совместном применении механического и ультразвукового способов его обработки.

Установлено, что к оптимальным условиям синтеза углерод-кремнеземистого наномодификатора относятся: помол ОДШСП с анионным поверхностно-активным веществом нафталин-формальдегидного типа (ПАВ НФТ) в шаровой мельнице в течение 60 мин.; ультразвуковое диспергирование (УЗД) полученного полуфабриката в воде при частоте ультразвука 35 кГц и температуре среды (20±2)°С.

Методом фотон-корреляционной спектроскопии доказано, что ультразвуковое диспергирование в воде шунгитосодержащих микрочастиц, стабилизированных ПАВ НФТ, способствует получению суспензии с размером частиц от 90 до 282 нм (рис. 1) и величиной ζ-потенциала минус 56,42 мВ. При этом в 3-х суточном возрасте суспензия содержит 76% частиц с размерами от 100 до 200 нм и 20% частиц с размерами от 200 до 300 нм.



**Рисунок 1 – Гистограммы распределения частиц по размерам отсевов дробления шунгитосодержащих пород III вида после ультразвукового диспергирования в присутствии ПАВ НФТ**

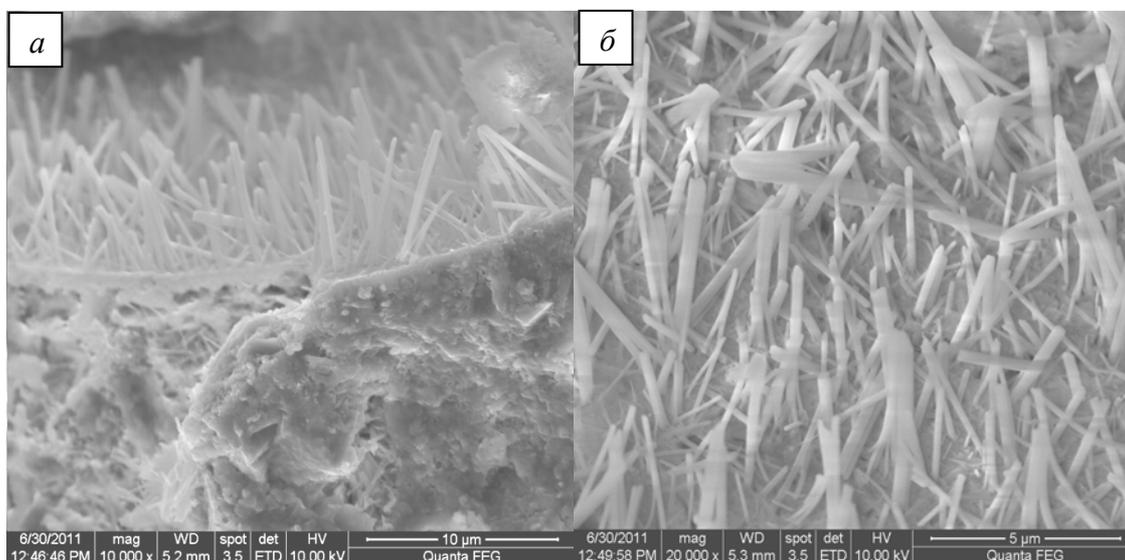
Снижение агрегационной и седиментационной устойчивости твердой фазы данной суспензии наблюдается через 90 суток с момента ультразвукового диспергирования: количество частиц с размерами в интервале от 100 до 200 нм уменьшается до 17%, содержание частиц с размерами от 200 до 300 нм увеличивается до 63%, а величина ζ-потенциала возрастает от минус 56,42 до минус 48,69 мВ.

Результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеноспектрального анализа показывают, что ультразвуковое диспергирование шунгитосодержащих отсевов, предварительно измельченных с ПАВ НФТ, способствует разделению их углеродной и минеральной фаз. При этом минеральная, главным образом, кремнеземистая составляющая под воздействием ультразвука подвергается эрозии с образованием нанодисперсных частиц с аморфизированным поверхностным слоем. В свою очередь, молекулы ПАВ препятствуют обратному сцеплению углеродных наноструктур с наночастицами SiO<sub>2</sub>, повышая их устойчивость к процессам агрегации и седиментации [5].

По данным рентгенофазового анализа установлено, что при введении УКН-модификатора в количестве 10% происходит перераспределение содержания портландита

$\text{Ca}(\text{OH})_2$  в твердеющем цементном камне (ЦК). Через 1 сутки твердения интенсивность отражения портландита резко повышается от 203 до 850 имп/с. Затем наблюдается снижение  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  от 695 до 525 имп/с через 3 суток, от 592 до 426 имп/с – 7 суток, от 332 до 213 имп/с – 28 суток твердения цементного камня.

Результаты СЭМ показывают, что структура цементного камня с УКН-модификатором в возрасте 28 суток (рис. 2) отличается наличием в трещинах и микропорах волокнистых столбчатых кристаллов с длиной от 0,5 до 10 мкм, шириной от 0,3 до 1,5 мкм. Морфология данных кристаллов характерна для гидросиликатов кальция типа CSH (I) [6].



**Рисунок 2 – Микроструктура цементного камня с УКН-модификатором:**  
*а – морфология новообразований на границе микропоры, × 10000;*  
*б – морфология новообразований внутри микропоры, × 20000*

Образование дополнительного количества продуктов гидратации, способствующих уплотнению структуры и повышению прочности цементного камня, происходит за счет взаимодействия интенсивно выделяющегося портландита с аморфизированной поверхностью кремнеземистой фазы модификатора. При этом углеродные наночастицы выполняют роль центров кристаллизации новообразований при твердении цементной системы, что способствует ускорению схватывания и твердения цементного теста (табл. 1).

**Таблица 1 – Влияние УКН-модификатора на свойства цементного теста и предел прочности при сжатии цементного камня**

Состав	НГ цементного теста, %	Сроки схватывания цементного теста, мин.		Предел прочности при сжатии, МПа			
		начало	конец	1 сут.	3 сут.	7 сут.	28 сут.
без добавки	25,8	210	324	21,7	30,2	35,9	49,4
5% модификатора	25,3	180	275	44,4	60,0	58,6	58,2
10% модификатора	24,8	186	282	51,6	66,3	68,1	78,8
15% модификатора	24,5	198	306	48,3	61,6	60,6	70,5

**Примечание:** в исследованиях применялся нормальнотвердеющий портландцемент класса прочности 42,5 (РУП «Белорусский цементный завод», г. Костюковичи, Белоруссия).

Максимальный прирост прочности цементного камня наблюдается при введении УКН-модификатора в количестве 10% от массы цемента. При этом прочность повышается в 2,4 раза через 1 сутки, в 1,6 раза – через 28 суток твердения.

Введение разработанного углерод-кремнеземистого наномодификатора в мелкозернистый бетон (МЗБ) в количестве 10% способствует снижению среднего размера его пор от 0,39 до 0,19 мкм, то есть в 2 раза, а общей пористости – от 17,8 до 13,6%, что объясняется образованием в поровом пространстве цементной матрицы дополнительного количества новообразований, способствующих уплотнению структуры бетона.

Результаты исследований (табл. 2) показывают, что использование УКН-модификатора приводит к повышению прочности МЗБ при изгибе в 3,2-3,7 раза, при сжатии в 1,9-2 раза, снижению истираемости в 3,8-4 раза и водопоглощения в 2,2-2,4 раза.

Таблица 2 – Физико-механические свойства мелкозернистого бетона с УКН-модификатором

№ состава	Состав, кг/м <sup>3</sup>			Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности, МПа						Истираемость, г/см <sup>2</sup>	Водопоглощение, %
	цемент	песок	вода		при изгибе			при сжатии				
					1 сут	3 сут	28 сут	1 сут	3 сут	28 сут		
1	500	1500	215	1960	0,8	1,4	2,4	4,4	12,1	27,7	0,031	4,08
10% УКН-модификатора												
2	500	1500	215	2242	1,9	5,2	7,6	7,6	25,7	45,5	0,015	2,05
3	500	1500	195	2297	2,2	6,2	8,8	8,5	33,4	57,2	0,008	1,80

**Примечание:** твердение образцов МЗБ размерами 4×4×16 см происходило в естественных условиях.

Кроме того, добавка позволяет повысить прочность МЗБ в ранние сроки твердения (через 1 и 3 суток): при изгибе в 2,3-2,8 и 3-4,4 раза, при сжатии – в 1,8-1,9 и 2,3-2,8 раза соответственно.

Таким образом, на основании выполненных исследований установлено, что углерод-кремнеземистая нанодисперсная добавка является эффективным модификатором структуры мелкозернистого бетона на нано- и микроуровнях, существенным образом изменяя его физико-технические характеристики.

На технологию получения УКН-модификатора на основе отсевов дробления шунгитосодержащих пород III вида получен патент [7].

Оценка данной технологии с экологической точки зрения дает основание утверждать, что негативные последствия от применения на производстве ультразвукового механоактиватора могут быть выявлены по факторам безопасности исходного сырья, а также материальных и энергетических выбросов в процессе сушки используемых отсевов и их тонкого измельчения совместно с ПАФ НФТ.

Тонкодисперсные шунгитосодержащие породы не взрывоопасны, не горючи, не токсичны, не оказывают вредного воздействия при контакте с человеком и на окружающую среду, характеризуются низкой радиоактивностью. Предельно допустимая концентрация пыли в воздухе рабочей зоны составляет 2,0 мг/м<sup>3</sup> [8].

*Используемое поверхностно-активное вещество нафталин-формальдегидного типа относится к 3-му классу опасности (умеренно опасное), не образует токсичных соединений в воздушной среде и сточных водах.*

Для минимального снижения количества пыли, образующейся в процессе сушки используемых отсевов и их измельчении совместно с ПАВ НФТ, в сушильном и помольном отделениях предусматривается установка циклонов, рукавных фильтров и пенного аппарата мокрой очистки, что позволит значительно улучшить санитарно-гигиеническую среду внутри производственного помещения и на прилегающей территории.

Ввод в технологический процесс получения углерод-кремнеземистого наномодификатора операции по ультразвуковому диспергированию является фактором, существенно снижающим приток других видов энергии, особенно тепловой, необходимых для получения наночастиц твердых веществ. Ультразвуковые технологии с аппаратным обеспечением на базе многофункциональных маломощных генераторов во многом удовлетворяют требованиям, предъявляемым к реутилизационным, ресурсосберегающим, экологически безопасным про-

цессам и обеспечивают более рациональное использование природных ресурсов.

Кроме того, получение разработанного модификатора для бетонов ультразвуковым способом способствует связыванию углерод-кремнеземистых наночастиц в воде и препятствует их попаданию в организм человека через дыхательные пути [8].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трифонова, Т.А. Экологическая безопасность наночастиц, наноматериалов и нанотехнологий: учеб. пособие [Текст] / Т.А. Трифонова, Л.А. Ширкин. – Владимир: ВГУ, 2009. – 64 с.
2. Соколов, В.А. Шунгиты – новое углеродистое сырье [Текст] / В.А.Соколов, Ю.К. Калинин, Е.Ф. Дюк-киев. – Петрозаводск, 1984. – 184 с.
3. Калинин, Ю.К. Шунгиты Карелии – для новых стройматериалов, в химическом синтезе, газоочистке, водоподготовке и медицине [Текст] / Ю.К. Калинин, А.И. Калинин, Г.А. Скоробогатов. – СПб: ВВМ, 2008. – 220 с.
4. Комохов, П.Г. Нанотехнология радиационностойкого бетона [Текст] / П.Г. Комохов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2006. – №5. – С. 22-23.
5. Лукутцова, Н.П. Особенности процессов структурообразования цементного камня с углерод-кремнеземистой нанодисперсной добавкой [Текст] / Н.П. Лукутцова, А.А. Пыкин, Е.Г. Карпиков // Строительные материалы. – М.: Наука. – 2011. – №9. – С. 66-67.
6. Кузнецова, Т.В. Микроскопия материалов цементного производства [Текст] / Т.В. Кузнецова, С.В. Самченко. – М.: МИКХиС, 2007. – 304 с.
7. Пат. 108033 Россия, МПК С04В 22/00, В28В 1/00. Энергоэффективная технологическая линия производства нанодисперсной добавки для бетонов [Текст] / Н.П. Лукутцова, С.А. Ахременко, А.А. Пыкин, Е.В. Дегтярев; Брянская гос. инж.-технолог. академия. заявлено 07.04.2011; опубл. 10.09.2011. – 6 с.
8. ТУ 5745-002-65808240-2012. Углерод-кремнеземистый наномодификатор для бетонов [Текст]. – Брянск: ФБУ «Брянский ЦСМ», 2012. – 10 с.

#### **Лукутцова Наталья Петровна**

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

#### **Пыкин Алексей Алексеевич**

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

#### **Ширко Светлана Валерьевна**

ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия», г. Брянск  
Студент  
Тел.: +7 953 295 57 87  
E-mail: shirkosveta@mail.ru

#### **Мацаенко Анастасия Александровна**

ФГБОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия», г. Брянск  
Студент  
Тел.: +7 915 801 09 51  
E-mail: macaenko32@yandex.ru

---

LUKUTCOVA N.P., PYKIN A.A., SHIRKO S.V., MACAENKO A.A.

### **TECHNICAL-AND-ECOLOGY STUDY FOR CONCRETE NANOMODIFICATOR PRODUCTION**

*The results of studies of the effect of carbon-silica modifier synthesized by means of ultrasonic dispersion of the screenings of crushing rocks chungite type III Zazhoginsky deposit (Karelia), the properties of the cement stone and fine-grained concrete. Proved technologies for environmental safety of the nanomodificator.*

**Keywords:** *schungite rocks, ultrasonic dispersion, carbon-silica nanomodificator, cement stone, fine-grained concrete, environmental safety.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Trifonova, T.A. Jekologicheskaja bezopasnost' nanochastic, nanomaterialov i nanotehnologij: ucheb. posobie [Tekst] / T.A. Trifonova, L.A. Shirkin. – Vladimir: VGU, 2009. – 64 s.
2. Sokolov, V.A. Shungity – novoe uglerodistoe syr'e [Tekst] / V.A.Sokolov, Ju.K. Kalinin, E.F. Djuk-kiev. – Petrozavodsk, 1984. – 184 s.
3. Kalinin, Ju.K. Shungity Karelii – dlja novyh strojmaterialov, v himicheskom sinteze, gazoochistke, vodopodgotovke i medicine [Tekst] / Ju.K. Kalinin, A.I. Kalinin, G.A. Skorobogatov. – SPb: VVM, 2008. – 220 s.
4. Komohov, P.G. Nanotehnologija radiacionnostojkogo betona [Tekst] / P.G. Komohov // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii HHI veka. – 2006. – №5. – S. 22-23.
5. Lukutcova, N.P. Osobennosti processov strukturoobrazovanija cementnogo kamnja s uglerod-kremnezemistoj nanodispersnoj dobavkoj [Tekst] / N.P. Lukutcova, A.A. Pykin, E.G. Karpikov // Stroitel'nye materialy. – M.: Nauka. – 2011. – №9. – S. 66-67.
6. Kuznecova, T.V. Mikroskopija materialov cementnogo proizvodstva [Tekst] / T.V. Kuznecova, S.V. Samchenko. – M.: MIKHiS, 2007. – 304 s.
7. Pat. 108033 Rossiya, MPK S04V 22/00, V28V 1/00. Jenergojeffektivnaja tehnologicheskaja linija proizvodstva nanodispersnoj dobavki dlja betonov [Tekst] / N.P. Lukutcova, S.A. Ahremenko, A.A. Pykin, E.V. Degtjarev; Brjanskaja gos. inzh.-tehnolog. akademija. zajavleno 07.04.2011; opubl. 10.09.2011. – 6 s.
8. TU 5745-002-65808240-2012. Uglerod-kremnezemistyj nanomodifikator dlja betonov [Tekst]. – Brjansk: FBU «Brjanskij CSM», 2012. – 10 s.

### **Lukutcova Natal'ja Petrovna**

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

### **Pykin Aleksej Alekseevich**

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

### **Shirko Svetlana Valer'evna**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk  
Student  
Ph.: +7 953 295 57 87  
E-mail: shirkosveta@mail.ru

### **Macaenko Anastasija Aleksandrovna**

Bryansk state engineering and technological academy, Bryansk  
Student  
Ph.: +7 915 801 09 51  
E-mail: macaenko32@yandex.ru

УДК 625.85

СОЛОМЕНЦЕВ А.Б., БАРАНОВ И.А.

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ ДОБАВОК ДЛЯ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНОГО АСФАЛЬТОБЕТОНА С ПОМОЩЬЮ МИКРОСКОПА AXIOSKOP 2 MAT

*Получены цветные микрофотографии образцов стабилизирующих добавок для ЩМА с помощью научно-исследовательского микроскопа Axioskop 2 MAT. При получении микрофотографий подобраны подходящие методы контрастирования, с помощью программного обеспечения произведена обработка микрофотографий, выполнены замеры параметров микроструктуры, в том числе геометрических параметров волокон и частиц исследуемых материалов. На основе полученных данных о микроструктуре добавок предложен механизм распределения целлюлозных добавок в битуме, а также дано объяснение возникновению битумоудерживающей способности для различных добавок.*

**Ключевые слова:** стабилизирующие добавки, битумоудерживающая способность, микроскопия, анализ микроструктуры, целлюлоза, волластонит, хризотил-асбест.

Для исследований микроструктуры использовался микроскоп Axioskop 2 MAT с серией объективов улучшенной цветовой коррекции «ЕС Eriplan-Neofluars», состоящий из модуля промежуточного увеличения Optovar, цифровой камеры Axioscam, компьютера с программным обеспечением для обработки микрофотографий, предметного столика с предметным стеклом, макро и микрометрическими винтами и микротвердометра. Модуль промежуточного увеличения Optovar дает возможность дискретной смены увеличений 1,0x-1,5x-2,0x-2,5x, позволяет повысить точность измерения, но не снизить предел минимального измеряемого объекта. За счет этого модуля объект, попадающий на матрицу, получается больше, на него попадает больше пикселей, что на порядок повышает точность измерения. С помощью микроскопа можно получить увеличение до 2000 раз. Цветная цифровая фотокамера Axioscam используется для передачи и дальнейшей обработки микрофотографий и имеет разрешение 5 млн. пикселей. Детальная проработка снимков осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения, разработанного фирмой Карл Цейсс. Компьютер управляет всеми функциями микроскопа: захват изображений, документирование, создание архивов, проведение ручных измерений.

Цветные микрофотографии получали путем фотографирования предварительно подготовленных образцов гранулированных целлюлозных добавок СД-1, СД-3, Viator 66, Torcel, гранулированной волокнистой минеральной добавки Хризотоп, полимерной добавки РТЭП, частиц порошковой добавки УНИРЕМ-001, частиц порошковой волластонитовой добавки Воксил-100, а так же частиц минерального порошка для асфальтобетонных смесей (для сравнения).

При обработке электронно-микроскопических изображений получали количественную информацию об элементах структуры, их взаимном расположении в пространстве. Производился замер геометрических параметров добавок, изучался их внешний вид, характер взаимного расположения, распределение битума.

Подготовка проб для исследования велась следующим образом. Гранулы волокнистых добавок разрушались в фарфоровой ступке до распушенного состояния. Из гранул полимерной добавки делался срез, порошковые добавки распределялись вручную. После этого на предметное стекло наносилось небольшое количество исследуемой пробы. Затем предметное стекло с пробой помещалось на предметный столик под объектив микроскопа для микрофотографирования. Для получения отчетливого изображения с помощью макрометрического винта перемещали зрительную трубу по высоте, затем микрометрической фокусировкой наводили резкость, пока объект не будет ясно виден. Для получения пригодных для анализа изображе-

ний предварительно получали от 10 до 15 микрофотографий при разном увеличении, чтобы наглядно получить микроизображение объекта исследования в проходящем свете.

Стабилизирующая добавка СД-1 представляет собой гранулы светло-коричневого цвета, изготовленные из волокон сульфатной небеленой целлюлозы. Согласно СТО 77142208-001-2007 содержание волокон длиной от 0,2 до 2,0 мм не менее 85%. Насыпная плотность добавки 0,55-0,65 г/см<sup>3</sup>, влажность по массе не более 8,0%. Оптимальное количество битума, т.е. битумоемкость асфальто вяжущего с добавкой СД-1, составляет 14% [1].

На рисунке 1 представлена микрофотография волокон СД-1. Переплетаясь между собой, волокна образуют пространственную структуру. Волокна имеют форму тонких пластинок и среднюю длину 1,4 мм, средняя толщина и ширина отдельно взятого волокна по его длине различная. На основании статистической обработки результатов измерений получены усредненные значения параметров волокон для СД-1: длина волокна 1,7 мм, ширина 0,05 мм, толщина 0,016 мм.

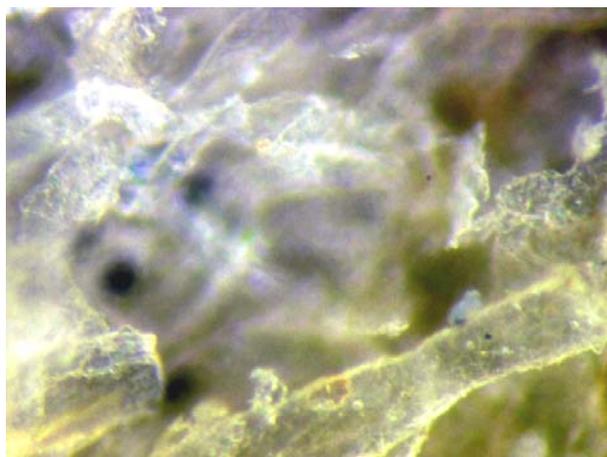


Рисунок 1 – Микрофотография СД-1 (увеличение X 400)

Добавка Торсел представляет собой спрессованные гранулы «Technocel 1004» серого цвета из целлюлозы по ТУ 5711-001-38956563-2003. Волокна целлюлозы модифицированы 10-15% парафиновых углеводородов и имеют длину 30-800 мкм. Насыпная плотность 0,35-0,40 г/см<sup>3</sup>, влажность 6%. Для асфальто вяжущего с добавкой Торсел битумоемкость составила 13% [1].

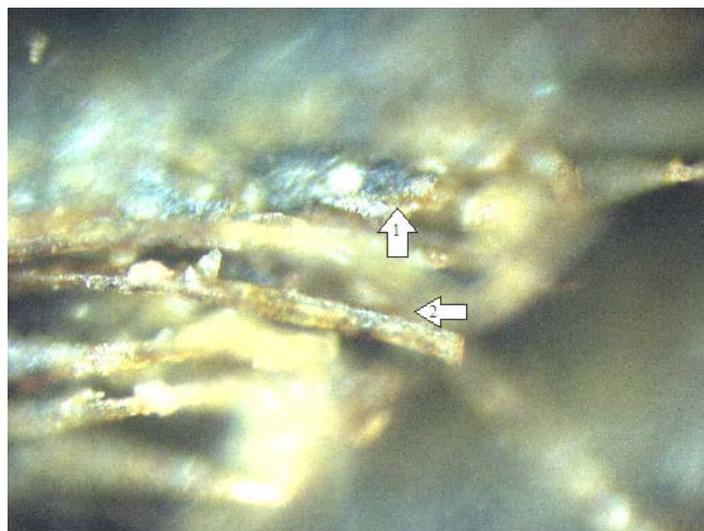
На микрофотографии (рис. 2) отчетливо видны хаотично извивающиеся длинные ленты волокон Торсел. В пространственной структуре отдельно взятых волокон на цветных микрофотографиях заметен красящий пигмент (поз. 1, 2), что указывает на их происхождение (вторичная переработка бумажных изделий). На волокнах заметны отблески воска (поз. 3). По микрофотографиям установили среднестатистические микроскопические параметры волокон: средняя длина волокна 0,9 мм, средняя ширина 0,05 мм, средняя толщина 0,012 мм.



*Рисунок 2 – Микрофотография Torcel (увеличение X 200)*

Стабилизирующая добавка Viator 66 представляет собой гранулированную смесь из примерно 67% технической целлюлозы и 33% битума, насыпная плотность 0,48-0,53 г/см<sup>3</sup> по ТУ 5718-001-18268513-01. Средняя длина волокон 1,1 мм, средняя толщина 0,045 мм. Для асфальтовяжущего с добавкой Viator 66 битумоемкость составила 14% [1].

На рисунке 3 представлена микрофотография среза гранулы Viator 66, а на рисунке 4 микрофотография отдельного волокна. На рисунке 3 наиболее четко в светлом поле контрастного света заметны волокна, имеющие на поверхности пятна с темным жирным блеском (рис. 3, поз. 1, 2) т.е. вкрапления битума. Процентное содержание битума на волокнах различное в зависимости от степени обработки и находится в пределах от 5 до 30%. Волокна Viator 66 (рис. 3, 4) имеют вид длинных плоских пластин. На отдельном целлюлозном волокне Viator 66 можно увидеть (рис. 4, поз. 1) поверхностную микросетку, образованную битумом. В данном случае битум не проник вглубь волокна, а адсорбировался на его поверхности. На основании полученных микрофотографий были определены среднестатистические размеры волокон целлюлозы: длина 1,7 мм, толщина 0,018 мм, ширина 0,05 мм.



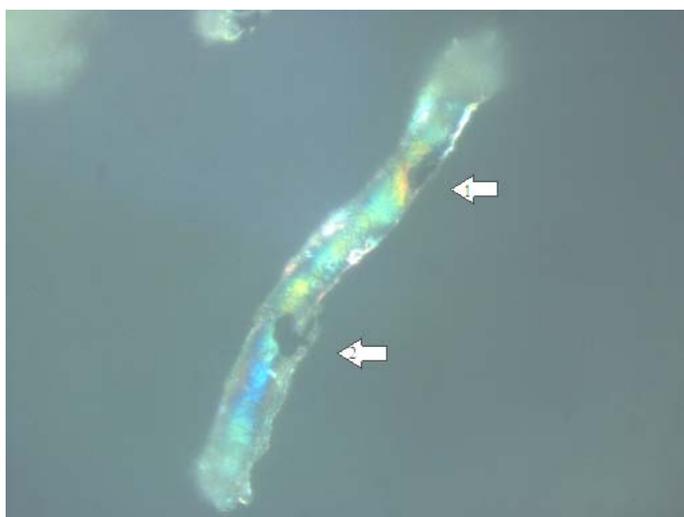
*Рисунок 3 – Микрофотография Viator 66 (увеличение X200)*



*Рисунок 4 – Микрофотография Viatop 66 в галогеновом освещении увеличение X500*

Добавка СД-3 представляет собой добавку СД-1, обработанную 15-20% битума. Значения насыпной плотности добавки СД-1 равны  $0,55-0,65 \text{ г/см}^3$ , влажность по массе не более 8,0%. Для асфальтовяжущего с добавкой СД-3 битумоемкость составила 14% [1].

Микрофотография волокна СД-3 (рис. 5) в поляризованных лучах контрастного света позволяет увидеть структурные особенности отдельного волокна. Капли битума заметны на отдельном волокне (рис. 5, поз. 1, 2) которые определены на фотографии как оттенки темного цвета, сливающегося с окружающим фоном. В поляризованных лучах света на волокне отражаются цвета: зеленый, синий и желтый. Это говорит об объемной поверхности волокна и неоднородной пространственной структуре, образованной элементарными фибриллами. Для СД-3 определены усредненные значения параметров: средняя длина волокна 1,5 мм, средняя ширина 0,048 мм, средняя толщина 0,016 мм.



*Рисунок 5 – Микрофотография волокна СД-3 в поляризованных лучах (увеличение X500)*

Далее была исследована добавка Хризотоп по ТУ 5718-001-0281476, которая является продуктом переработки минерала хризотил-асбеста. Насыпная плотность Хризотоп составляет  $0,95 \text{ г/см}^3$ , влажность не более 3%, содержание технологической мелочи не более 3,5%. Минерал змеевиковый хризотил-асбест входит в группу серпентинита и представляет собой водный силикат магния, имеющий длинноволокнистую структуру. Его волокна – это тончайшие по-

лые трубки диаметром  $2,6 \times 10^{-5}$  мм, характеризующиеся повышенной прочностью. Удельная поверхность волокон хризотил-асбеста  $2000 \text{ см}^2/\text{г}$ . Из-за жестких связей в гранулах Хризотоп недостаточно хорошо обволакивается битумом, т.к. волокна плохо отделяются друг от друга при перемешивании с битумом. После предварительного распушивания у Хризотоп проявляется достаточная битумоудерживающая способность. Битумоемкость его в асфальтовяжущем составляет 13% [1].

При подготовке проб для исследования гранулы Хризотоп были также распушены. На рисунках 6, 7, 8 представлены микрофотографии Хризотоп в проходящем свете на темном фоне. Из рисунка 6 видно, что структура Хризотоп представляет собой распушенные пучки микроволокон. Волокна располагаются параллельно друг другу. Кроме больших пучков микроволокон (рис. 6) могут быть пучки поменьше, состоящие из 10-15 микроволокон (рис. 7, поз. 1). На рисунке 8 представлена микрофотография исходного микроволокна цилиндрической формы и имеющего ответвления (рис. 8, поз. 1, 2). По микрофотографиям установили геометрические параметры волокон и пучков: пучки имеют диаметр около 0,15 мм. В пучке может находиться 10-250 штук микроволокон с диаметром около 0,003 мкм. Средняя длина волокон составляет 2,8 мм.

Резиновый термоэластопласт РТЭП по ТУ 5718-001-79259416-2006 представляет собой сферические гранулы черного цвета, внутри находится полимер класса полиолефинов, снаружи гранула покрыта битумом. Средний диаметр гранул 4 мм, насыпная плотность  $0,347 \text{ г}/\text{см}^3$ . Для асфальтовяжущего с РТЭП битумоемкость составила 12,5% [1].

Исследовался плоский срез гранулы толщиной 1,7 мм. На срезе (рис. 9) отчетливо заметен полиолефиновый полимерный носитель (поз. 1, 2) имеющий на снимке коричневый цвет, битум черного цвета с отблесками (поз. 3). Также на срезе видны пустоты, составляющие примерно 20% площади среза (поз. 4), которые образовались из-за вовлеченного в добавку воздуха при изготовлении.

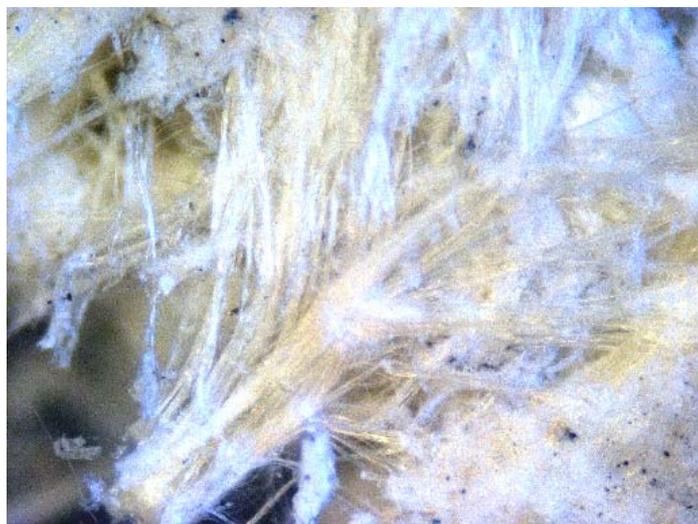


Рисунок 6 – Микрофотография Хризотоп (увеличение X100)

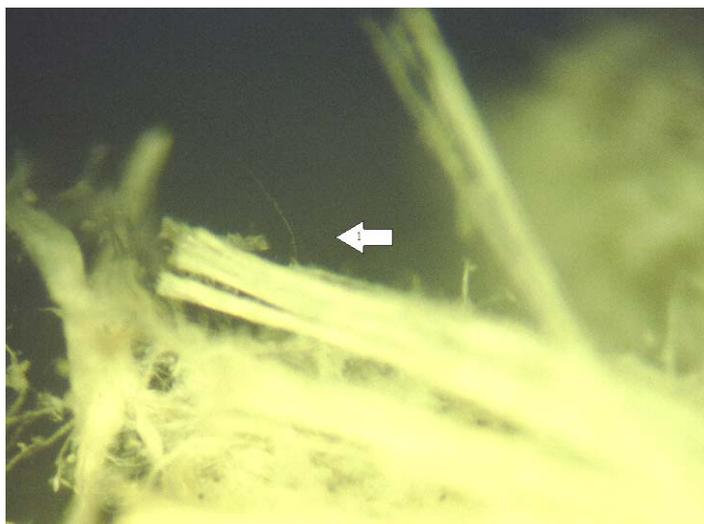


Рисунок 7 – Микрофотография Хризотол (увеличение X100)

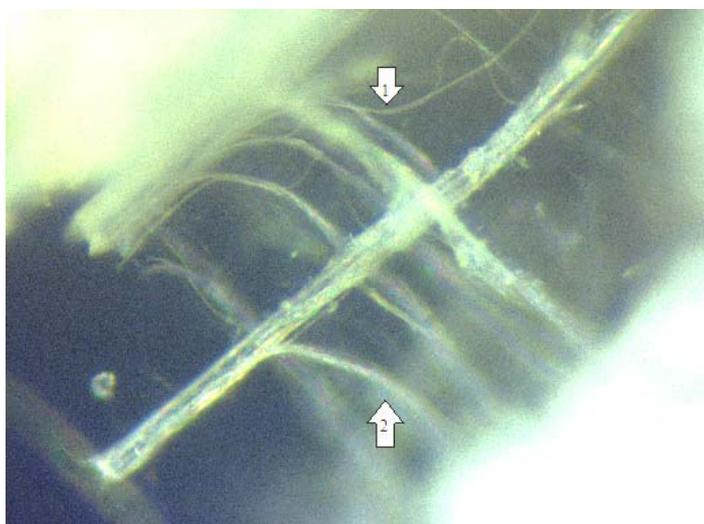


Рисунок 8 – Микрофотография Хризотол (увеличение X500)

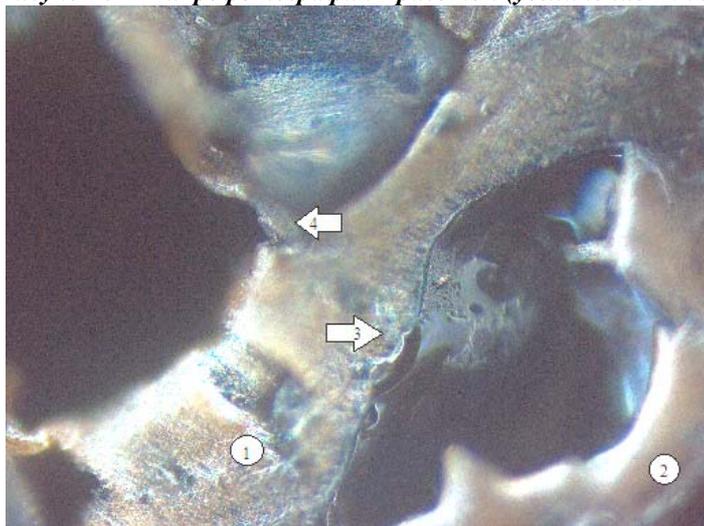


Рисунок 9 – Микрофотография фрагмента среза РТЭП (увеличение X200)

Порошковая добавка УНИРЕМ-001 по ТУ 2519-0001-74145205-08 представляет собой модифицирующую композицию, содержащую активный резиновый порошок с размером частиц не более 0,1-0,8 мм, полученный путем термомеханического измельчения резинового

вулканизата, гелеобразующего адгезионного агента, ускорителя набухания резины в битуме и структурирующего агента. Насыпная плотность  $0,47 \text{ г/см}^3$ , удельная поверхность  $5000 \text{ см}^2/\text{г}$ . Битумоемкость добавки УНИРЕМ-001 в асфальтовяжущем составила 13% [2].

Для получения микрофотографий на предметное стекло наносилось небольшое количество резинового порошка, затем делались микрофотографии. На микрофотографиях УНИРЕМ-001 видны частицы дробленой резины (рис. 10, поз. 1, 2) различного размера в диапазоне от 0,1 до 1,0 мм с минеральными включениями продолговатой игольчатой формы (рис. 11, поз. 1, 2, 3). Можно предположить, что это частицы метасиликата игольчатой структуры [3]. Размеры этих минеральных частиц находятся в диапазоне 0,005-0,1 мм. Как показали измерения, количество метасиликата составляет примерно 15% по массе от общей площади всех частиц.

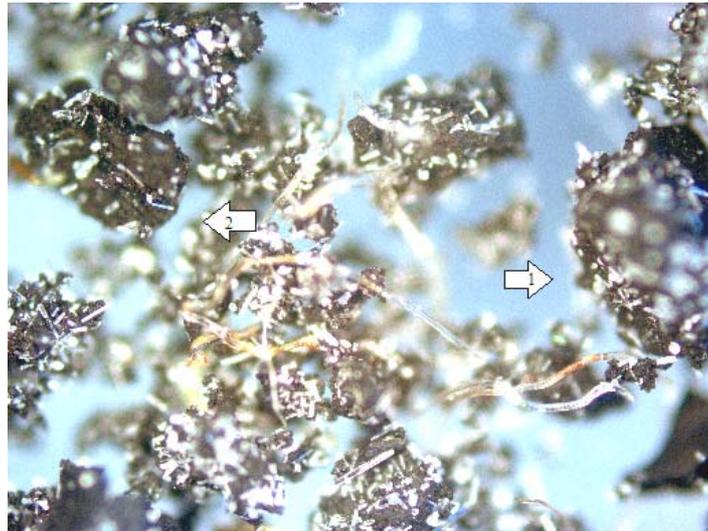
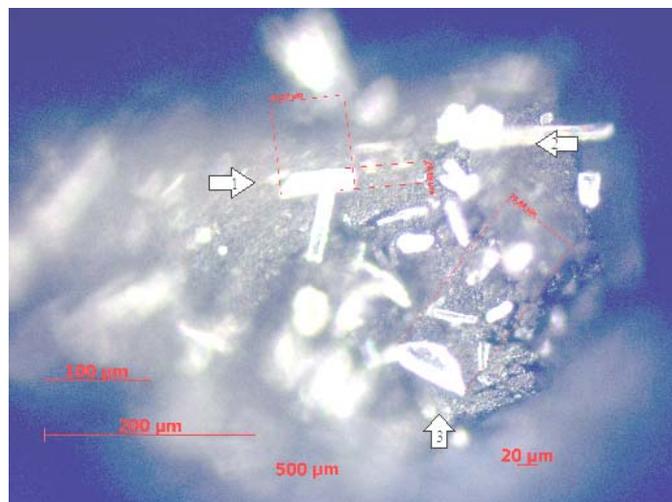


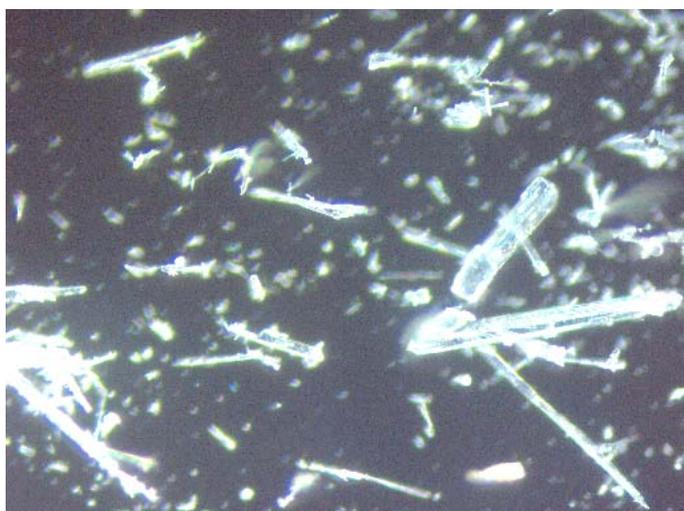
Рисунок 10 – Микрофотография УНИРЕМ-001 (увеличение X50)

Добавка в виде минерального порошка Воксил-100 представляет собой измельченный минерал волластонита, который является природным метасиликатом кальция ( $\text{CaSiO}_3$ ) с характерной игольчатой структурой кристаллов, при раскалывании которых образуется зерна игольчатой формы. Твердость по Моосу волластонита равна 4,5-5,5, анизотропия частиц волластонита 3-20 L/D. Удельная поверхность зерен волластонитового порошка  $1000-4000 \text{ см}^2/\text{г}$ , плотность  $2,8-2,9 \text{ г/см}^3$ . Битумоемкость волластонитового порошка в асфальтовяжущем с 4% его содержанием составила 12,5% [4]. Для сравнения был взят также доломитовый минеральный порошок, используемый для приготовления асфальтобетонных смесей, с битумоемкостью в асфальтовяжущем 11%.

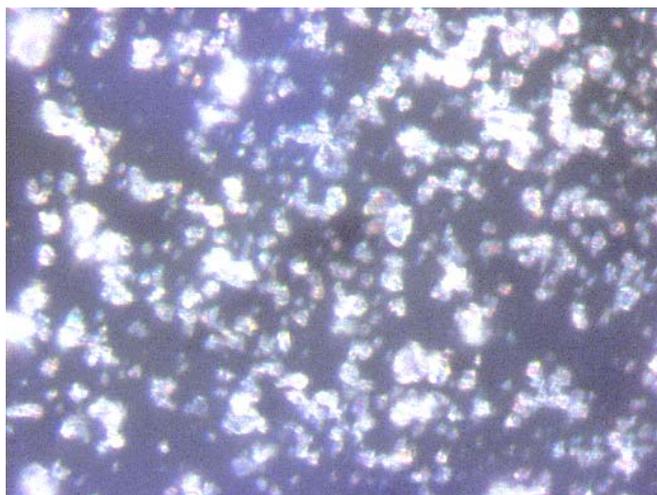


*Рисунок 11 – Микрофотография УНИРЕМ-001  
(увеличение X200)*

Для анализа микроструктуры на предметное стекло рассеивалось небольшое количество волластонитового и доломитового порошка. Затем предметное стекло с образцом помещалось под объектив микроскопа для микрофотографирования. Из рисунков 12, 13 видно, что Воксил-100 в отличие от доломитового минерального порошка имеет большое количество частиц игольчатой формы. Частицы доломитового порошка имеют кубовидную форму, поэтому и характеризуется более плотной упаковкой в смеси. Удельная поверхность доломитового минерального порошка  $3770 \text{ см}^2/\text{г}$ , волластонитового –  $1000\text{-}4000 \text{ см}^2/\text{г}$ . Согласно исследованиям [5] волластонит марки Воксил-100 характеризуется высоким содержанием частиц удлиненной формы. Степень игольчатости исходного волластонитового порошка составляет 30%. Это значение степени игольчатости было подтверждено нами путем статического подсчета частиц удлиненной формы в ограниченном поле микроскопа и соотношении полученного результата с общим количеством видимых частиц в этом же поле.



*Рисунок 12 – Микрофотография волластонитового минерального порошка (увеличение X200)*



*Рисунок 13 – Микрофотография доломитового минерального порошка (увеличение X200)*

В таблице 1 представлен зерновой состав резинового порошка добавки УНИРЕМ-001, волластонитового порошка добавки Воксил-100 и доломитового минерального порошка, используемого как компонент в асфальтобетонных смесях, в том числе в щебеночно-мастичных. Зерновой состав был определен путем отсева на стандартных ситах по ГОСТ Р 52129-2003 «Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические

условия». Из таблицы 1 видно, что Воксил-100 содержит 71,3% частиц мельче 0,071 мм, а доломитовый минеральный порошок – 73,9%. Возможно, на результаты отсева на ситах повлияло большое количество частиц игловатой формы, часть из которых не прошла через сито 0,071 мм. Наибольшее количество частиц мельче 0,071 мм содержит добавка УНИРЕМ-001 – 79,6%, однако в ней присутствует примерно 7% частиц крупнее 0,315 мм, которых нет в добавках Воксил-100 и в минеральном порошке.

Таблица 1 – Зерновой состав порошковых добавок

№ п/п	Зерновой состав, % по массе	Название добавки			Значения по ГОСТ 52129-2003
		УНИРЕМ-001	Воксил-100	Минеральный порошок	
1	Мельче 1,25 мм	100	-	-	Не менее 100
2	Мельче 0,315 мм	93,22	100	100	Не менее 90
3	Мельче 0,071 мм	79,6	71,3	73,9	От 70 до 80

В таблице 2 приведены параметры микроструктуры порошковых добавок. Диаметр резиновых частиц УНИРЕМ-001 находится в пределах от 0,03 до 0,4 мм, для минерального порошка диаметр – 0,035-0,018 мм. Входящие в состав добавки УНИРЕМ-001 игловатые частицы имеют размеры 0,03×0,012×0,006 мм, Воксил-100 имеет схожие значения 0,02×0,004×0,006 мм. Степень игольчатости Воксил-100 равна 32%.

Таблица 2 – Параметры микроструктуры порошковых добавок

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра для различных добавок		
		УНИРЕМ-001	Воксил-100	Минеральный порошок
1	Диаметр частиц, мм	от 0,1 до 1,0	от 0,057-0,026	от 0,035 до 0,018
2	Размеры игловатых частиц, мм			
	длина	0,03	0,02	-
	толщина	0,012	0,004	
	ширина	0,006	0,006	
3	Доля частиц мельче 0,071 мм, %	79,6	71,3	73,9
6	Степень игольчатости, %	-	32	-

В таблице 3 представлены параметры микроструктуры волокнистых добавок, определенные с помощью микроскопа Аxioskop 2 МАТ. Как видно из таблицы, самые длинные волокна имеют добавки Хризотоп – 4,1 мм, длина волокон добавок СД-1 и СД-3 меньше примерно в 2,5 раза и составляет 1,5-1,7 мм. Волокна добавок Topcel и Viator 66 самые короткие (0,9-1,0 мм). Средняя толщина волокон примерно одинакова для всех добавок и составляет 0,042-0,05 мм, средняя ширина также примерно одинакова для всех добавок и составляет 0,012-0,018 мм. Строение волокон асбестовой добавки Хризотоп отличается от строения волокон целлюлозных добавок по форме и по расположению волокон в пространстве. Волокна целлюлозных добавок – это тонкие длинные пластинки, которые могут иметь лентообразные формы. Волокна добавки Хризотоп – это тонкие цилиндрические нити, которые образуют микропучки и пучки.

Таблица 3 – Параметры микроструктуры волокнистых добавок

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра для волокнистых добавок				
		СД-1	ТОРСЕЛ	СД-3	Viator 66	Хризотоп
1	Средняя длина волокна, мм	1,7	0,9	1,5	1,0	-
2	Средняя ширина волокна, мм	0,05	0,05	0,048	0,042	-
	Средняя толщина волокна, мм	0,016	0,012	0,016	0,018	-

3	Длина волокон и микроволокон, мм	-	-	-	-	4,1
4	Диаметр пучка микроволокон, мм	-	-	-	-	0,048
5	Диаметр микроволокна, мм	-	-	-	-	0,003
6	Расположение волокон в пространстве	взаимное переплетение и образование пространственной структуры	взаимное переплетение и образование пространственной структуры	утопленные в битум волокна с контактом через битумную прослойку	утопленные в битум волокна с контактом через битумную прослойку	пучки и микроручки волокон
7	Форма волокон	тонкие длинные пластины	лентообразные формы	тонкие длинные пластины	тонкие длинные пластины	тонкие нити цилиндрической формы

В таблице 4 приведены показатели свойств добавок и исходных материалов. Насыпная плотность гранул целлюлозных добавок изменяется от 0,25 г/см<sup>3</sup> у добавки Torcel до 0,55-0,65 г/см<sup>3</sup> у добавки СД-1, СД-3 и Viator 66. У резинового порошка УНИРЕМ-001 насыпная плотность равна 0,465 г/см<sup>3</sup>, а насыпная плотность хризотил-асбестовой добавки Хризотоп составляет 0,95 г/см<sup>3</sup>. Насыпная плотность минеральных порошков существенно выше: 1,3-1,4 г/см<sup>3</sup> – у волластонитового порошка Воксил-100 и 1,27 – у доломитового порошка. Удельная поверхность целлюлозных добавок на порядок ниже, чем у порошковых добавок и добавки Воксил-100, однако, в асфальтовяжущем целлюлозные добавки обладают большей битумоудерживающей способностью даже при незначительном их содержании (3%), чем минеральные добавки, а также добавки УНИРЕМ-001 и РТЭП. Это можно объяснить особым механизмом распределения целлюлозных волокон в битуме и наличием сильно разветвленной пространственной микроструктурой волокон целлюлозных добавок в сравнении с другими добавками.

Хорошо известна подвижность макромолекул целлюлозы, которая при взаимодействии с водой обеспечивает ее увеличение в объеме, т.к. целлюлоза способна набухать. При взаимодействии с битумом, имеющим температуру 140-160°С, волокна целлюлозы увеличиваются в объеме, битум проникает внутрь волокон. Благодаря перемешиванию и однородному распределению образуется битумо-целлюлозная микроструктура в асфальтовяжущем. Набухшие целлюлозные волокна, наполненные битумом, образуют разветвленные пространственные структуры, расположенные между зёрнами минерального порошка, что обеспечивает удержание ориентированного и объемного битума.

Таблица 4 – Показатели свойств добавок и исходных материалов

№ п/п	Наименование добавки	Вид исходного материала	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	Битумоемкость в асфальтовяжущем, %
1	СД-1	целлюлоза	0,55-0,65	100 <sup>1</sup>	14
2	ТОРСЕЛ	целлюлоза	0,25	100	13
3	СД-3	целлюлоза	0,55-0,65	100	14
4	Viator 66	целлюлоза	0,55-0,65	100	14
5	Хризотоп	хризотил-асбест	0,95	2000 <sup>2</sup>	13
6	УНИРЕМ-001	резина	0,465	5000[3]	13
7	Воксил 100	волластонит	1,3-1,4	1000-4000 <sup>1</sup>	12,5
8	Минеральный порошок	доломит	1,27	3770	11
9	РТЭП	полимерный материал класса полиолефинов	0,3-0,4	-	12,5

Примечание: Клесов, А.А. Древесно-полимерные композиты [Текст] / А.А. Клесов. – М.: НОТ. – 2010. – С. 736.

<sup>2</sup> ГОСТ 12871-93 Хризотиловый асбест.

Минеральные добавки Воксил-100, Хризотоп при перемешивании с горячим битумом распределяются в нем и образуют ориентируемый слой битума на поверхности частиц и волокон. Волокна добавки Хризотоп также образуют разветвленную пространственную структуру, чтобы удерживать и объемный и ориентированный битум. При использовании добавок УНИРЕМ-001 битумоудерживающая способность появляется вследствие увеличения вязкости битума при структурировании битума, структурообразующим компонентом добавки УНИРЕМ-001, а также, возможно, процессами взаимодействия резиновых частиц с битумом. При использовании добавки РТЭП битумоудерживающая способность обусловлена увеличением вязкости битума при расплавлении гранул добавки в битуме и перемешивании, что приводит к увеличению битумных пленок на минеральных зернах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соломенцев, А.Б. Оценка битумоудерживающей способности стабилизирующих добавок для щебеночно-мастичного асфальтобетона в асфальтовязущем [Текст] / А.Б. Соломенцев, И.А. Баранов // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2010. – №4(30). – С. 53-58.
2. Соломенцев, А.Б. Влияние добавки УНИРЕМ-001 на свойства асфальтовязущего и щебеночно-мастичного асфальтобетона [Текст] / А.Б. Соломенцев, И.А. Баранов // Материалы 5-ой Всероссийской научно-практической конференции «Управление качеством образования, продукции и окружающей среды»: Сб. тез. докл. – Бийск: Изд-во БТИ АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 29 сентября – 1 октября 2011. – С. 159-164.
3. Пат. 2377262 Российская Федерация МПК7 С 08 L 17/00, С 08 J 11/06, С 04 В 26/26. Полимерная композиция для асфальтобетонных смесей и способ получения модифицированной асфальтобетонной смеси [Текст] / Р.А. Горелик, В.Н. Балыбердин, Б.М. Слепая, М.И. Лернер; заявитель и патентообладатель ООО «Уником». – №2008129422/04; заявл. 24.03.2008; опубл. 27.12.2009 г.
4. Соломенцев, А.Б. Оценка возможности использования волластонитового минерального порошка в качестве стабилизирующей добавки для щебеночно-мастичного асфальтобетона [Текст] / А.Б. Соломенцев, И.А. Баранов, Ю.Б. Жаринов // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2011. – №1(33). – С. 70-75.
5. Коробщикова, Т.С. Оценка влияния способа и продолжительности измельчения волластонита на его фактор анизотропии [Текст] / Т.С. Коробщикова, Н.А. Орлова // Тезисы и доклады IV-ой Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Прикладные аспекты химической технологии, полимерных материалов и наносистем» (Полимер-2010): Сб. тез. докл. – 2010. – С. 79-83.

**Соломенцев Александр Борисович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство автомобильных дорог»  
Тел.: +7 (4862) 73-43-67  
E-mail: oantc@ostu.ru

**Баранов Игорь Александрович**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Ассистент кафедры «Строительство автомобильных дорог»  
Тел.: +7 (4862) 73-43-67  
E-mail: IGBaranow@yandex.ru

---

A.B. SOLOMENCEV, I.A. BARANOV

**PARAMETER ESTIMATION OF THE MICROSTRUCTURE  
OF ADDITIVES FOR MASTIC-MACADAM ASPHALT  
CONCRETE, USING A MICROSCOPE AXIOSKOP 2 MAT**

*Color micrographs obtained samples of stabilizing additives with SMA research microscope Axioskop 2 MAT. Upon receipt of the appropriate methods is selected photomicrographs contrast, using the software processing of photomicrographs made measurements of the parameters of the microstructure, including the geometrical parameters of fibers and particles of the materials. On the basis of the data on the microstructure of the mechanism of distribution of additive cellulosic additives in bitumen, and also gives an explanation of the emergence of ability to retain bitumen for different additives.*

**Keywords:** *Stabilizing additives, ability to retain bitumen, microscopy, cellulose, wollastonite, hrizotil-asbestos.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Solomencev, A.B. Ocenka bitumouderzhivajuwej sposobnosti stabilizirujuwih dobavok dlja webenochno-mastichnogo asfal'tobetona v asfal'tovjazhuwem [Tekst] / A.B. Solomencev, I.A. Baranov // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2010. – №4(30). – S. 53-58.
2. Solomencev, A.B. Vlijanie dobavki UNIREM-001 na svojstva asfal'tovjazhuwego i webenochno-mastichnogo asfal'tobetona [Tekst] / A.B. Solomencev, I.A. Baranov // Materialy 5-oj Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Upravlenie kachestvom obrazovaniya, produkcii i okruzhajuwej sredy»: Sb. tez. dokl. – Bijsk: Izd-vo BTI AltGTU im. I.I. Polzunova, 29 sentjabrja – 1 oktjabrja 2011. – S. 159-164.
3. Pat. 2377262 Rossijskaja Federacija MPK7 S 08 L 17/00, C 08 J 11/06, C 04 B 26/26. Polimernaja kompozicija dlja asfal'tobetonnyh smesej i sposob poluchenija modifitsirovannoj asfal'tobetonnoj smesi [Tekst] / R.A. Gorelik, V.N. Balyberdin, B.M. Slepaja, M.I. Lerner; zajavitel' i patentoobladatel' OOO «Unikom». – №2008129422/04; zajavl. 24.03.2008; opubl. 27.12.2009 g.
4. Solomencev, A.B. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya vollastonitovogo mineral'nogo poroshka v kachestve stabilizirujuwej dobavki dlja webenochno-mastichnogo asfal'tobetona [Tekst] / A.B. Solomencev, I.A. Baranov, Ju.B. Zharinov // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2011. – №1(33). – S. 70-75.
5. Korobwikova, T.S. Ocenka vlijaniya sposoba i prodolzhitel'nosti izmel'cheniya vollastonita na ego faktor anizotropii [Tekst] / T.S. Korobwikova, N.A. Orlova // Tezisy i doklady IV-oj Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh «Prikladnye aspekty himicheskoy tehnologii, polimernyh materialov i nanosistem» (Polimer-2010): Sb. tez. dokl. – 2010. – S. 79-83.

**Solomentsev Alexander Borisovich**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Candidate of technical sciences, senior lecturer of department «Construction of highways»  
Ph.: +7 (4862) 73-43-67  
E-mail: oantc@ostu.ru

**Baranov Igor Aleksandrovich**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Assistant to department « Construction of highways»  
Ph.: +7 (4862) 73-43-67

E-mail: IGBaranow@yandex.ru

УДК 666.97.058

ФЕДОСОВ С.В., АКУЛОВА М.В., ГУНИНА Н.М., ПОТЕМКИНА О.В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА И РАЗМЕРА ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КОМПОЗИТА

*В работе исследовалось влияние крупности заполнителя на физико-механические свойства бетона. Для этого определялся предел прочности при сжатии у образцов тяжелого бетона, заполнитель – гравий. Показано, что крупность заполнителя влияет на прогрев цементного композита. Проведен детальный анализ теплопереноса в бетонах на легких и тяжелых заполнителях различного гранулометрического состава, который показал необходимость учитывать крупность и характеристики заполнителя при составлении моделей теплопроводности и теплопереноса в бетоне при нагреве из-за изменения тепловых потоков в цементном камне и растворе при тепловом переходе к заполнителю.*

**Ключевые слова:** бетон, механические свойства, заполнитель, теплопроводность.

Заполнители вместе с цементным камнем формируют структуру бетона конгломератного типа. Заполнители влияют на структуру бетона, развиваемую как на микро-, так и на макроуровнях [1]. Поверхность зерен заполнителя при схватывании и последующем твердении цементного камня выполняет роль подложки, облегчающей образование кристаллических зародышей гидратов. Интенсивность этого процесса зависит от степени гидрофильности и адсорбционной способности поверхности подложки, а также ее кристаллографической ориентировки. На поверхности заполнителя, химически не реагирующего со щелочными растворами, быстро выделяются кристаллические зародыши, представленные преимущественно гидросиликатами кальция, и в последующем их размеры увеличиваются быстрее, чем у кристаллов гидросиликатов в межзерновом пространстве. Это приводит к увеличению плотности контактного слоя цементного камня, и он приобретает большую прочность при сжатии.

Важным элементом структуры бетона является контактная зона между цементным камнем и заполнителем. Создание контактных слоев начинается уже на начальной стадии твердения бетонной смеси. Взаимодействие цементного камня с заполнителями может быть механическим, физико-химическим, химическим и смешанным [1].

Как один из составляющих бетонного камня заполнитель оказывает большое влияние на структуру и свойства цементных композитов. Поэтому на свойства цементного композита должны оказывать влияние как вид, так и размер зерен заполнителя.

В данной работе проводилось исследование влияния вида и размера заполнителя на свойства цементного композита.

В качестве мелкого заполнителя в тяжелых бетонах использовался песок Храмцовского месторождения, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-93. Модуль крупности песка составляет 2,0-2,5. Насыпная плотность 1310 кг/м<sup>3</sup>, истинная плотность 2600 кг/м<sup>3</sup>.

В качестве крупного заполнителя использовался гравий Храмцовского карьера фракций 10 мм, 20 мм и 40 мм. Для сравнения использовался керамзитовый гравий фракцией 10 мм.

Вязущим являлся портландцемент М500, соответствующий требованиям ГОСТ 10178-85 «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия». Для затворения бетонной смеси использовалась вода из городской водопроводной сети, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-79 «Вода для бетонов и растворов. Технические условия».

В зависимости от вида и крупности заполнителя проводился подбор состава бетона. Для сравнения отдельно изготавливался цементно-песчаный раствор и цементное тесто. В таблице 1 приведены составы бетона с разной крупностью заполнителя.

В работе исследовалось влияние крупности заполнителя на физико-механические свойства бетона. Для этого определялся предел прочности при сжатии у образцов тяжелого бетона, заполнитель – гравий. Данные приведены на рисунке 1.

Таблица 1 – Составы бетона на объем 1 м<sup>3</sup>

Заполнитель	Гравий			Керамзит	Песок
	40 мм	20 мм	10 мм		
Цемент, кг	259	280	302	157	249
Вода, л	350	190	205	342	102
Песок, кг	617	603	786	438	1656
Крупный заполнитель, кг	1416	1364	1360	355	-
Итого:	2467	2437	2653	1292	2007

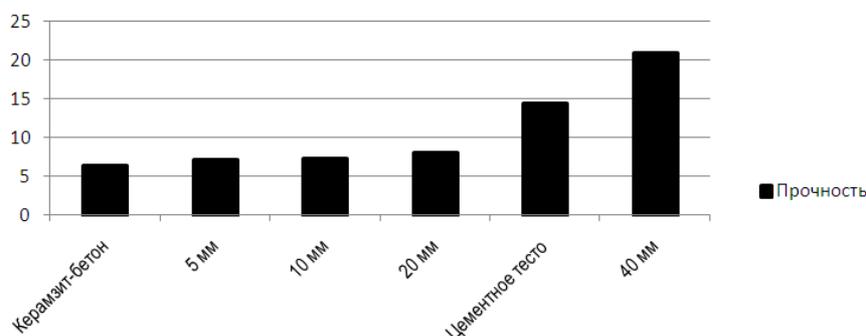


Рисунок 1 – Зависимость предела прочности бетона при сжатии (в МПа) от вида и крупности заполнителя (на рисунке в мм указана крупность гравия)

Как видно из приведенных данных наибольшую прочность показывает бетонный камень на гравии крупностью 40 мм, наименьшую – крупностью 5 мм (цементно-песчаная смесь). Цементный камень также показывает большую прочность по сравнению со смесью с мелким и средним заполнителем. Наименьшая прочность у керамзитобетона, что обусловлено низкой прочностью на сжатие заполнителя – керамзита (из-за его большой пористости).

Одним из основных физических свойств бетона является его средняя плотность. Средняя плотность тяжелого бетона в зависимости от фракционного состава гравия, керамзитобетона и цементного камня приведена на рисунке 2. Как видно из приведенных данных наименьшая средняя плотность наблюдается у бетонов с заполнителем на гравии крупностью 10 мм, наибольшая – у мелкозернистого бетона.

Плотность косвенно характеризует теплопроводность бетонного камня, поэтому для анализа влияния вида и крупности заполнителя на физические свойства бетонов определялась теплопроводность бетонного камня на гравии и цементно-песчаном растворе. В качестве характеристики теплопроводности исследовалась температура прогрева бетонных образцов на различных расстояниях от источника нагрева и разной длительности нагрева.

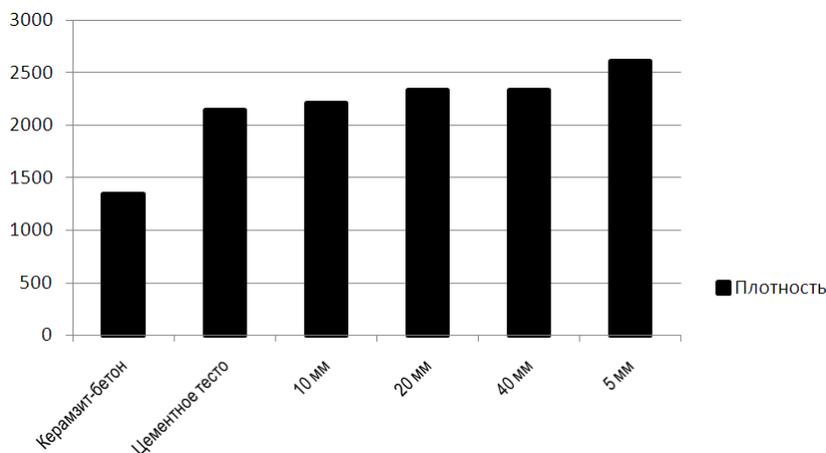
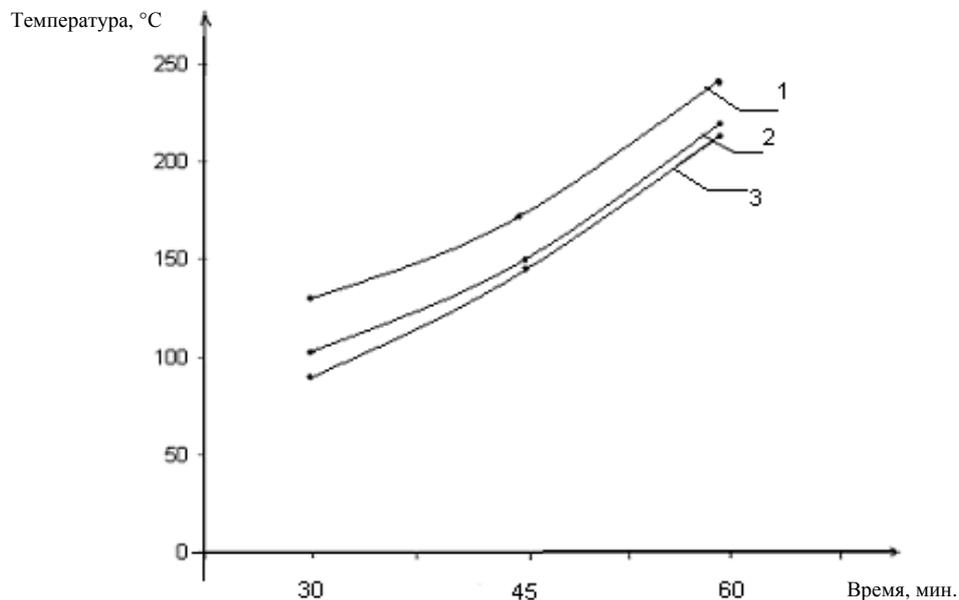


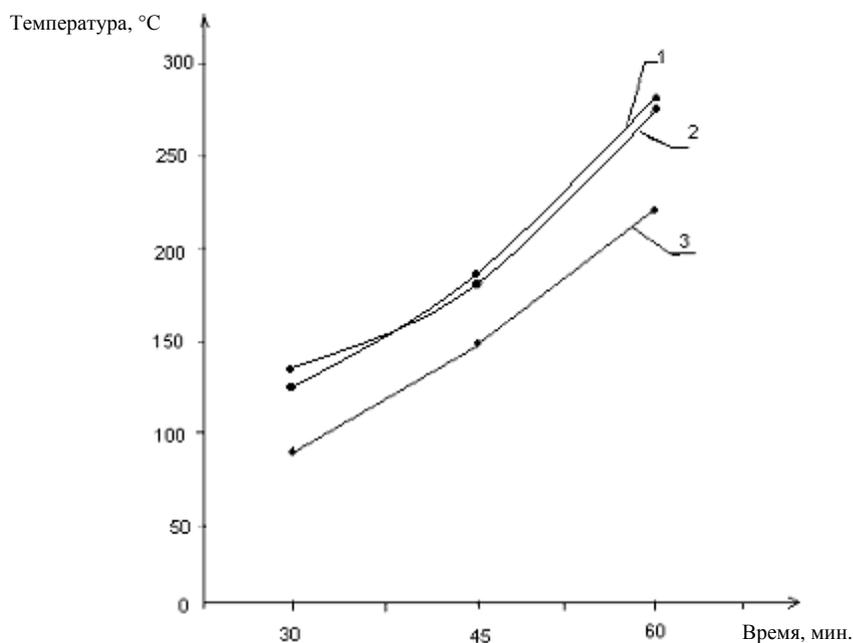
Рисунок 2 – Зависимость средней плотности бетона (в кг/м<sup>3</sup>) от вида и крупности заполнителя (на рисунке в мм указана крупность гравия)

Температура прогрева бетона определяется экспериментальным путем. Для определения температуры боковые стенки образцов бетонных кубов были теплоизолированы минеральной ватой, с боку кубов высверливались отверстия на расстоянии 1, 5 и 9 см от источника нагрева. Температура определялась с помощью термопары через различные промежутки времени (30 минут и 60 минут). По полученным данным были построены графики, приведенные на рисунках 3-8.



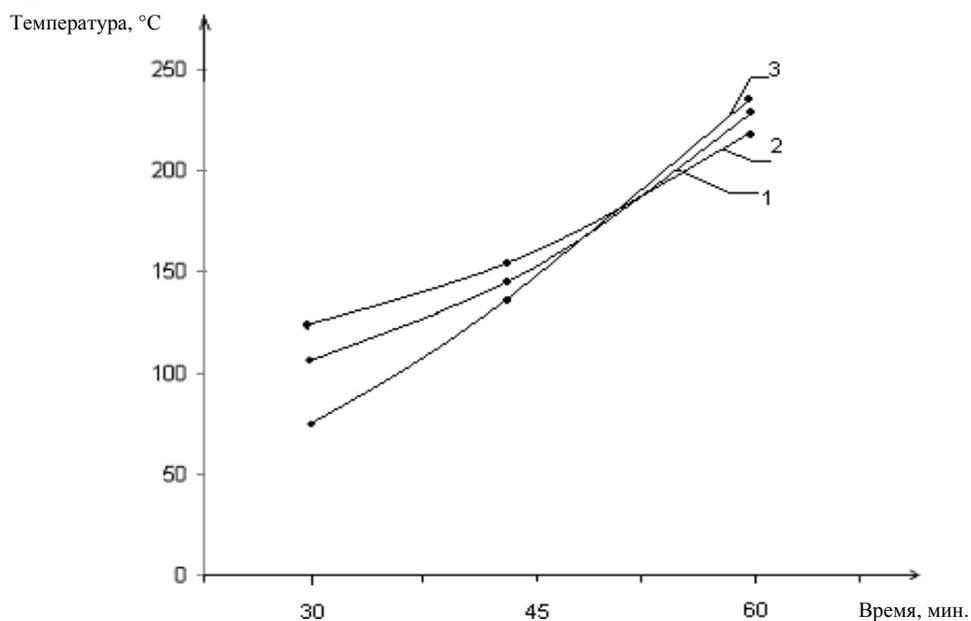
**Рисунок 3 – Зависимость изменения температуры в образцах затвердевшего цементного теста от времени нагрева на расстоянии:**

- 1 – 1 см от источника нагрева;**
- 2 – 5 см от источника нагрева;**
- 3 – 9 см от источника нагрева**

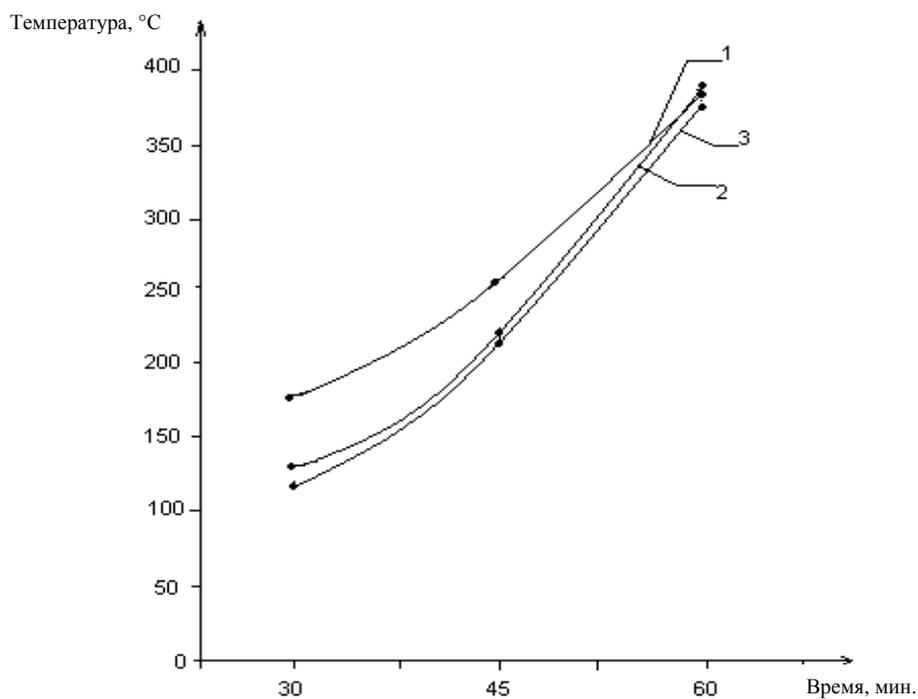


**Рисунок 4 – Зависимость увеличения температуры в образцах цементно-песчаного раствора от времени нагрева на расстоянии:**

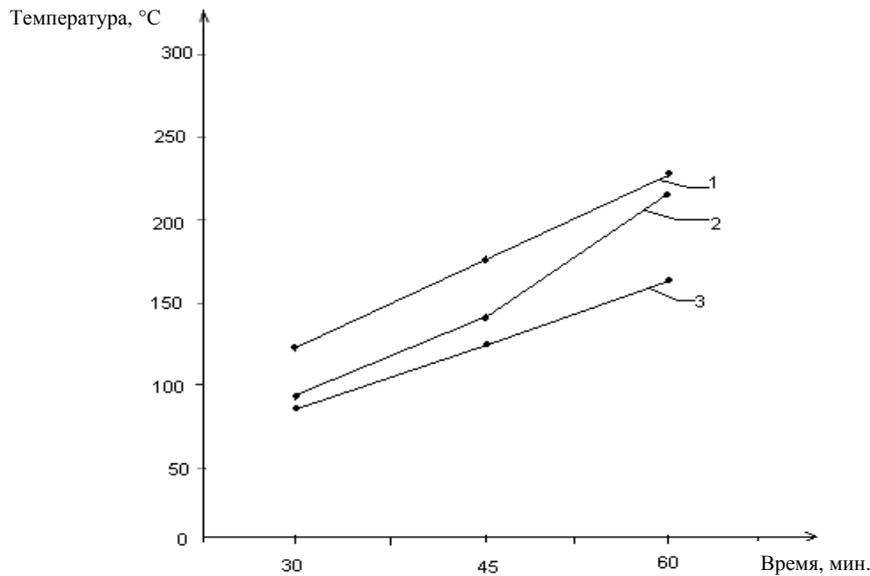
- 1 – 1 см от источника нагрева;**
  - 2 – 5 см от источника нагрева;**
  - 3 – 9 см от источника нагрева.**
- Крупность заполнителя 5 мм**



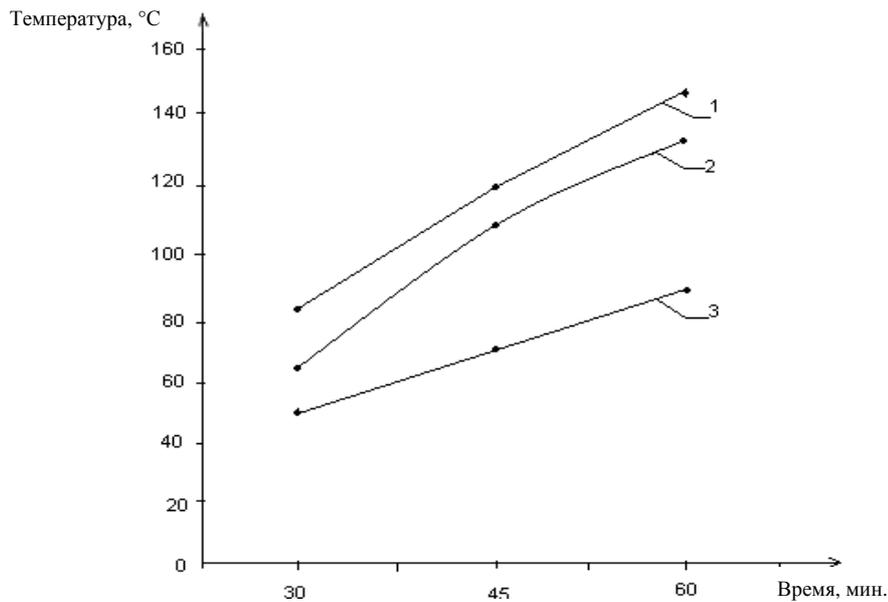
**Рисунок 5 – Зависимость увеличения температуры в бетонных образцах от времени нагрева на расстоянии:**  
 1 – 1 см от источника нагрева;  
 2 – 5 см от источника нагрева;  
 3 – 9 см от источника нагрева.  
 Крупность гравия 10 мм



**Рисунок 6 – Зависимость увеличения температуры в бетонных образцах от времени нагрева на расстоянии:**  
 1 – 1 см от источника нагрева;  
 2 – 5 см от источника нагрева;  
 3 – 9 см от источника нагрева.  
 Крупность гравия 20 мм



**Рисунок 7 – Зависимость увеличения температуры в бетонных образцах от времени нагрева на расстоянии:**  
 1 – 1 см от источника нагрева;  
 2 – 5 см от источника нагрева;  
 3 – 9 см от источника нагрева.  
 Крупность гравия 40 мм



**Рисунок 8 – Зависимость увеличения температуры в образцах керамзитобетона от времени нагрева на расстоянии:**  
 1 – 1 см от источника нагрева;  
 2 – 5 см от источника нагрева;  
 3 – 9 см от источника нагрева.  
 Крупность керамзита 10 мм

Как видно из приведенных данных образцы тяжелого бетона на гравии 10 мм с меньшей средней плотностью показывают и меньшую теплопроводность. Однако для тяжелого бетона данная тенденция не всегда соблюдается. Так наиболее сильный прогрев показывают образцы с заполнителем крупностью 20 мм, хотя средняя плотность у них близка к средней плотности бетона на гравии 40 мм, который показывает большую теплоизолирующую способность. Анализ графиков показал, что наименьший прогрев наблюдается у керамзитобетона. Более сильно прогрев происходит у тяжелого бетона с крупностью гравия 20 см на глубине 1,

5, 9 см, причем увеличение температуры по сравнению с остальными образцами наблюдается при прогреве в течение 60 минут.

Анализ графиков на рисках 3-8 показал неравномерность распределения тепловых потоков в образцах во времени и пространстве в зависимости от состава их заполнителя. Так, затвердевшее цементное тесто на глубине 1 см прогревается нелинейно. Величины нагрева образца на расстоянии 5 и 9 см почти совпадают, что показывает большую теплопроводность цементного камня. При введении в смесь песка (фракция 5 мм) картина переноса температуры меняется. Близкие значения температур прогрева наблюдаются на глубине образца 1 и 5 см, цементно-песчаное тесто на большой глубине (9 см) прогревается медленней. Однако конечная температура прогрева образца достигает больших значений, чем у цементного камня.

Тяжелый бетон с крупным заполнителем 40 мм показал лучшую теплоизолирующую способность вглубь образца (на расстоянии 9 см) при любом времени нагрева, поэтому может рекомендоваться для создания термостойких ограждающих конструкций и защитных слоев арматур от огневого и теплового воздействия.

Таким образом, детальный анализ теплопереноса в бетонах на легких и тяжелых заполнителях различного гранулометрического состава показал необходимость учитывать крупность и характеристики заполнителя при составлении моделей теплопроводности и теплопереноса в бетоне при нагреве из-за изменения тепловых потоков в цементном камне и растворе при тепловом переходе к заполнителю.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов, Ю.М. Технология бетона [Текст]: Учеб. пособие для технологич. спец. строит. вузов. 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1978. – 415 с.

### **Федосов Сергей Викторович**

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный архитектурно-строительный университет», г. Иваново  
Академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительное материаловедение и специальные технологии»  
Тел.: +7 (4932) 32-85-40  
E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

### **Акулова Марина Владимировна**

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный архитектурно-строительный университет», г. Иваново  
Советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Производство строительных материалов»  
Тел.: +7 908 562 04 52  
E-mail: m\_akylova@mail.ru

### **Гунина Наталья Михайловна**

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный архитектурно-строительный университет», г. Иваново  
Аспирант кафедры «Производство строительных материалов»  
Тел.: +7 920 367 50 52  
E-mail: Gunina.natascha@jandex.ru

### **Потемкина Ольга Владимировна**

Ивановский институт ГПС МЧС России, г. Иваново  
Тел. +7 905 156 46 19  
Докторант кафедры «Производство строительных материалов»  
E-mail: molodkina@mail.ru

---

S.V. FEDOSOV, M.V. AKULOVA, N.M. GUNINA, O.V. POTEKINA

## **THE INVESTIGATION OF EFFECT OF THE AGGREGATE TYPE AND SIZE ON THE CEMENT COMPOSITE'S PROPERTIES**

*The effect of aggregate size on the mechanical properties of concrete is studied in the paper. Compressive strength of samples was determined by heavy concrete, the gravel was used as an ag-*

gregate. It is shown that the size of the aggregate affects the heating of the cement composite. The detailed analysis of heat transfer in concrete at the light and heavy aggregates of different particle size distribution is conducted. It showed the need to take into account the particle size and characteristics of the aggregate in the preparation of aggregate models and heat transfer in concrete when heated due to changes in heat flow in the cement stone and in the solution in the process of the thermal transition to a aggregate.

**Keywords:** concrete, the mechanical properties, a aggregate, heat transfer/

## BIBLIOGRAPHY

1. Bazhenov, Ju.M. Tehnologija betona [Tekst]: Ucheb. posobie dlja tehnologich. spec. stroit. vuzov. 2-e izd., pererab. – M.: Vyssh. shk., 1978. – 415 s.

### **Fedosov Sergey Viktorovich**

Ivanovo state architecture and construction university, Ivanovo

Doctor of technical science, professor, manager of department «Building materials technology and special technologies»

Ph.: +7 (4932) 32-85-40

E-mail: rector@igas.ru

### **Akulova Marina Vladimirovna**

Ivanovo state architecture and construction university, Ivanovo

Doctor of technical science, professor of department «Manufacture of building materials»

Ph.: +7(4932) 32-66-33

E-mail: m,akylova@mail.ru

### **Gunina Natal'ja Mihajlovna**

Ivanovo state architecture and construction university, Ivanovo

Post-graduate student of department «Manufacture of building materials»

Ph.:+7 920 367 50 52

E-mail: Gunina.natascha@jandex.ru

### **Potyomkina Olga Vladimirovna**

Doctoral candidate

Ph.:+7 905 156 46 19

E-mail: molodkina@mail.ru

ХРИСТОФОРОВ А.И., ХРИСТОФОРОВА И.А., ЕРОПОВ О.Л.

## ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНАЯ КОМПОЗИЦИЯ, МОДИФИЦИРОВАННАЯ АСБЕСТОМ И ТЕТРАЭТОКСИСИЛАНОМ

*Развитие строительного производства требует совершенствования физико-механических свойств существующих строительных материалов. Одним из наиболее распространенных материалов является бетон, являющийся надежным, прочным и долговечным материалом. Модификация бетонов неорганическими и органическими веществами, наночастицами получает все большее развитие. Введение в состав бетонной композиции модифицирующих добавок приводит к увеличению подвижности бетонной смеси до 2,5% и повышению прочности бетона при сжатии до 60%. Увеличение физико-механических характеристик позволяет получать бетон заданной марки с меньшим расходом цемента, что позволяет снизить стоимость бетона.*

**Ключевые слова:** асбест, бетон, модификация, органические вещества.

Совершенствование и модификация надежных и проверенных временем строительных материалов является главной задачей, стоящей перед исследователями. Для их решения создаются новые и улучшаются надежные материалы путем повышения физико-механических характеристик. В гражданском строительстве надежно зарекомендовал себя бетон, обладающий высокой прочностью при сжатии, низкой пористостью, водопоглощением, высокой морозо- и жаростойкостью и др. Совершенствование основных физико-механических характеристик бетона является основной задачей. Жесткие экономические рамки, в которые сейчас поставлено все строительное производство, заставляют улучшать физико-механические характеристики бетонов и бетонных смесей путем введения малого количества высокоэффективных добавок с целью повышения прочности бетона или понижения количества цемента при сохранении марки бетона, что уменьшит стоимость строительства квадратного метра зданий и сооружений.

Одними из важных показателей изделий из бетона являются прочность при сжатии и подвижность бетонной смеси. Введение в композицию незначительного количества добавок, позволяющих повысить прочность бетона при сжатии в 1,2-1,8 раза, имеет решающее значение. Такими добавками могут служить высокопрочные наночастицы, служащие армирующими и наноструктурирующими элементами композита. Также существует возможность использования в малых количествах добавок органических соединений, например, кремнийорганических веществ, которые уменьшают поверхностное натяжение на границе раздела фаз «цементное вяжущее – вода» и служат центрами структурообразования цементного камня.

В работе такими добавками были выбраны хризотилловый асбест [10] и тетраэтоксисилан [11].

Асбест – волокнистый материал, легко расщепляющийся на тонкие прочные волокна, которые представляют собой кристаллы рулонной или трубчатой структуры. Их прочность при растяжении вдоль волокон – до 3000 МПа, что выше прочности стали.

Тетраэтоксисилан (ТЭОС) – прозрачная жидкость со слабым эфирным запахом, растворяется в инертных органических растворителях, реагирует с водой, высшими спиртами. Обоснованием выбора тетраэтоксисилана послужило то, что в результате гидролиза тетраэтоксисилан выделяет этанол и наноразмерные частицы оксида кремния. Эти частицы оксида кремния служат центром структурообразования при формировании цементного камня.

Связующим в бетонной смеси являлся Мордовский цемент М500 Д0 по ГОСТ 31108-2003 [7], рентгенофазовый анализ выявил следующий химико-минералогический состав портландцемента: 1)  $C_3S$  (алит) – 41%; 2)  $C_2S$  (белит) – 26%; 3)  $C_3A$  – 25%; 4)  $C_4AF$  – 7%; остальное – второстепенные оксиды.

Заполнителем служил карьерный кварцевый песок дисперсностью меньше 0,63 мм Улыбышевского месторождения Владимирской области.

Прочность бетона при сжатии измерялась в лабораторных условиях по ГОСТ 10180-90 [8], подвижность бетонной смеси проверялась в соответствии с ГОСТ 10181-2000 [9].

В качестве образцов были взяты:

1. Контрольный образец бетона;
2. Образец бетона с добавкой асбеста;
3. Образец бетона с добавкой асбеста и тетраэтоксисилана.

Образец 1: цемент – 100 мас. ч., песок – 300 мас. ч., вода – 70 мас. ч. Полученный бетон имеет среднюю прочность при сжатии через 28 суток – 17,5 МПа (рис. 1), подвижность бетонной смеси – 7 см.

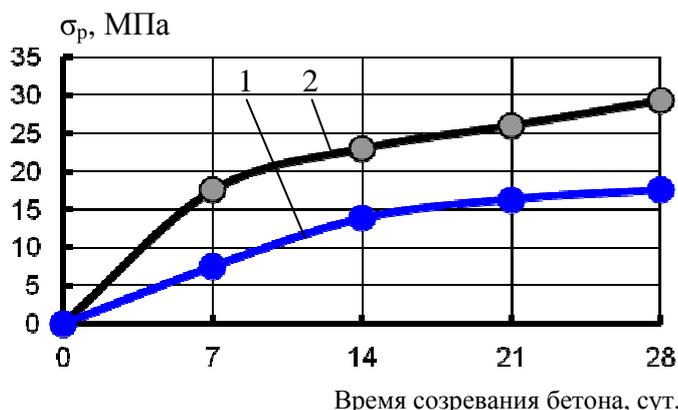


Рисунок 1 – Зависимость прочности мелкозернистого бетона от времени созревания и состава смеси:

- 1) песок – 300 мас. ч., цемент – 100 мас. ч., вода – 70 мас. ч.;
- 2) песок – 300 мас. ч., цемент – 100 мас. ч., вода – 70 мас. ч., асбест – 3 мас. ч.

На рисунке 2 представлена рентгенограмма минерального состава бетона образца 1. Поскольку бетон имеет частично аморфную структуру, то количественный фазовый анализ этих образцов провести не удалось. Наличие гидроксида кальция указывает на прохождение реакции гидротации алита с водой. Из приведенной рентгенограммы видна незначительная активность кристаллов алита (C<sub>3</sub>S) и белита (C<sub>2</sub>S), что свидетельствует о прошедшей гидратации во время образования бетонного камня:

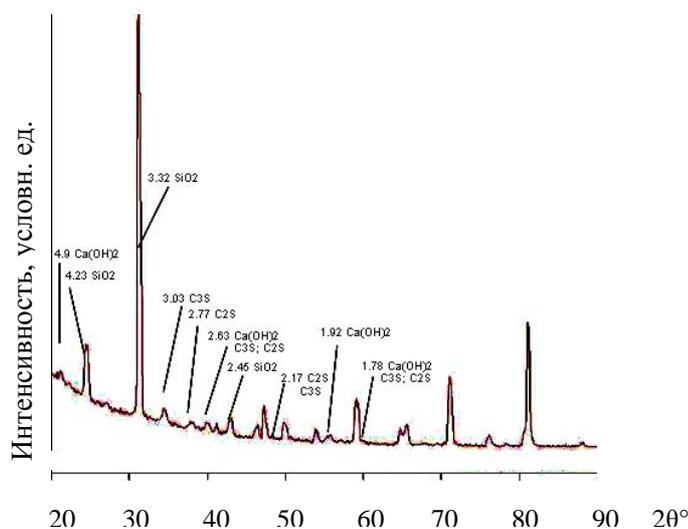
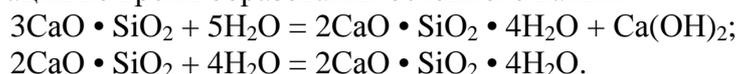


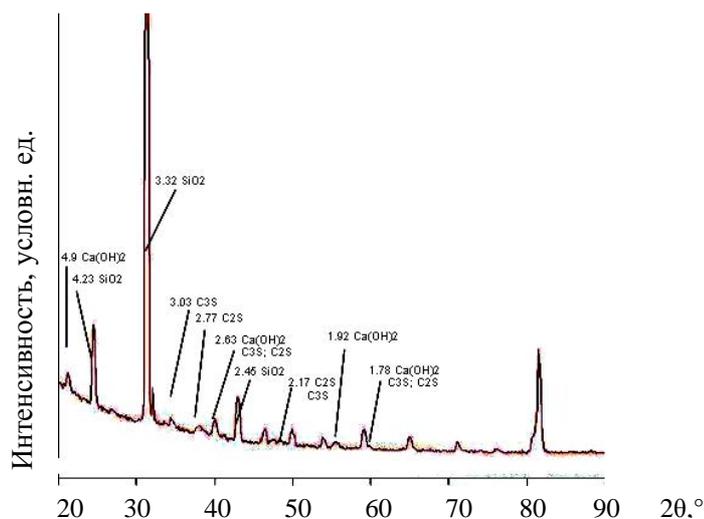
Рисунок 2 – Рентгенограмма минерального состава контрольного образца бетона

- 1 – Ca(OH)<sub>2</sub> (гидроксид кальция); 2 – SiO<sub>2</sub> (оксид кремния);
- 3 – C<sub>3</sub>S (алит – трехкальциевый силикат); 4 – C<sub>2</sub>S (белит – двухкальциевый силикат)

$\text{SiO}_2$  – песок, входящий в состав бетона. Значительная интенсивность оксида кремния обусловлена большим содержанием песка в бетонной композиции (3 части песка на 1 часть цемента).

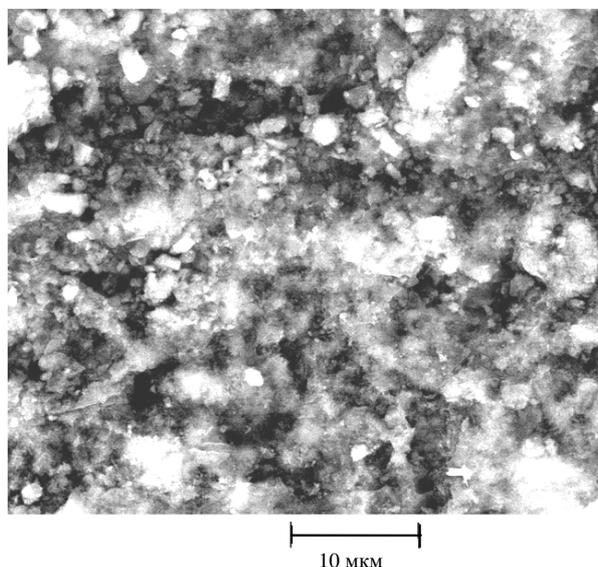
Образец 2: в смесь песка – 300 мас. ч. и цемента – 100 мас. ч. вводилась вода с добавкой, подготовленная следующим образом: вода – 70 мас. ч., асбест – 3 мас. ч., перемешанные мешалкой в течение 15 минут. Осадка конуса у полученной бетонной смеси составляет 8 см. Средняя прочность бетона при сжатии через 28 суток составляет 29,3 МПа (см. рис. 1).

На рисунке 3 представлена рентгенограмма минерального состава образца 2. Из приведенной рентгенограммы видно, что закристаллизованность образца аналогична контрольному, следовательно, асбест незначительно влияет на уровень кристаллизации и служит армирующим элементом бетона.



**Рисунок 3 – Рентгенограмма минерального состава бетона с добавкой асбеста**  
 1 –  $\text{Ca(OH)}_2$  (гидроксид кальция); 2 –  $\text{SiO}_2$  (оксид кремния);  
 3 –  $\text{C}_3\text{S}$  (алит – трехкальциевый силикат); 4 –  $\text{C}_2\text{S}$  (белит – двухкальциевый силикат);

Были проведены исследования поверхности бетонного камня на электронном растровом микроскопе, результаты которых приведены на рисунке 4. Структура бетона плотная, поверхность зернистая, расположение заполнителя хаотичное, плавающее. Видно, что преобладают конгломераты небольшого размера.



**Рисунок 4 – Поверхность бетона с добавкой асбеста,**

полученная при увеличении в 5000 раз

Образец 3: в смесь песка – 300 мас. ч. и цемента – 100 мас. ч. вводилась вода с добавкой, подготовленная следующим образом: вода – 70 мас. ч., асбест – 3 мас. ч. и ТЭОС – 0,015 мас. ч., перемешанные мешалкой в течение 15 минут. Полученная бетонная смесь имела осадку конуса 8 см. Средняя прочность бетона при сжатии через 28 суток составляет 20,3 МПа. Изменение прочности бетона при сжатии от времени созревания представлено на рисунке 5.

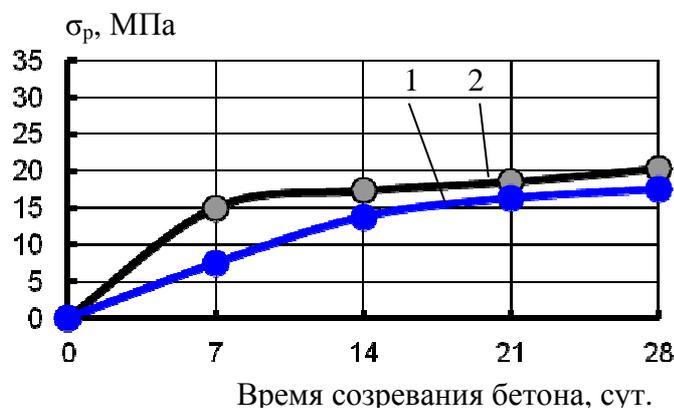


Рисунок 5 – Зависимость прочности мелкозернистого бетона от времени созревания и состава смеси:

- 1) песок – 300 мас. ч., цемент – 100 мас. ч., вода – 70 мас. ч.;
- 2) песок – 300 мас. ч., цемент – 100 мас. ч., вода – 70 мас. ч., асбест – 3 мас. ч., ТЭОС – 0,015 мас. ч.

Из рентгенограммы (рис. 6) видно, что дифракционные отражения  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Ca(OH)}_2$  для модифицированного образца 3 имеют меньшую интенсивность по сравнению с контрольным образцом, что объясняется их более полным взаимодействием. Интенсивность дифракционного отражения алита и белита в образце 3 значительно меньше по сравнению с бездобавочным образцом, что свидетельствует об их более полном взаимодействии с водой. Также следует отметить, что общий уровень закристаллизованности образца 3 значительно выше по сравнению с образцом 1. При добавлении тетраэтоксисилана в количестве 0,015% от массы цемента существенного изменения минерального состава не наблюдается.

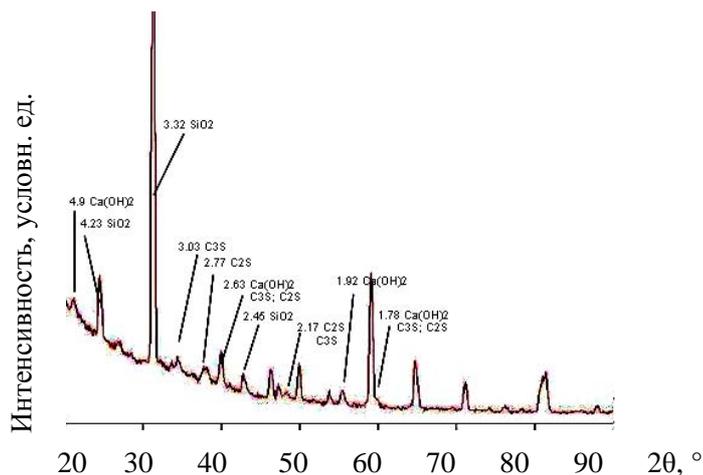
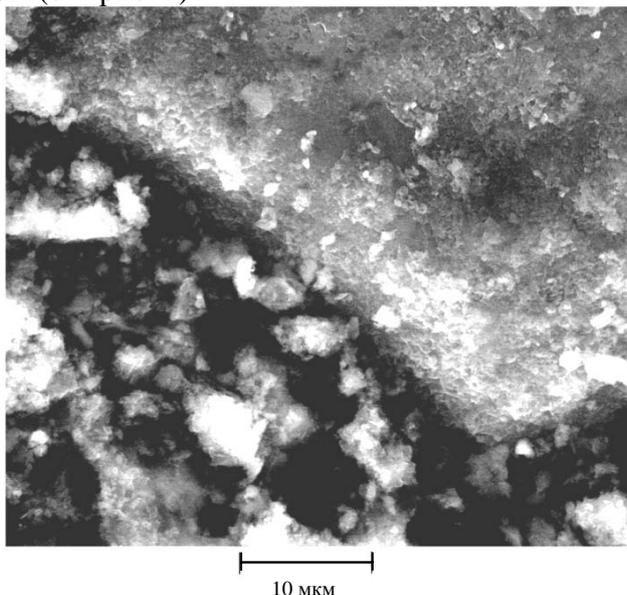


Рисунок 6 – Рентгенограмма минерального состава бетона с добавкой асбеста и тетраэтоксисилана

- 1 –  $\text{Ca(OH)}_2$  (гидроксид кальция); 2 –  $\text{SiO}_2$  (оксид кремния);
- 3 –  $\text{C}_3\text{S}$  (алит – трехкальциевый силикат); 4 –  $\text{C}_2\text{S}$  (белит – двухкальциевый силикат)

Бетон имеет плотную структуру, поверхность зернистая, при увеличении в 5000 раз видно, что расположение заполнителя хаотичное, плавающее. Конгломераты имеют преимущественно малые размеры (см. рис. 7).



*Рисунок 7 – Поверхность бетона с добавкой асбеста и тетраэтоксисилана, полученная при увеличении в 5000 раз*

Введение асбеста в бетонную смесь приводит к повышению прочности при сжатии на 67%. Это происходит за счет наноразмерных частиц асбеста, служащих наноструктурирующим и армирующим элементом в бетонной смеси. Добавление асбеста с тетраэтоксисиланом в бетонную смесь в качестве добавок повышает подвижность бетонной смеси до 2,5%, прочность бетона при сжатии на 28 суток в 1,16 раза. Данный эффект достигается тем, что асбест служит наноструктурирующим и армирующим элементом в бетоне. В результате гидролиза тетраэтоксисилана идет снижение поверхностного натяжения на границе раздела фаз «цемент – вода», за счет чего уменьшается внутреннее напряжение вследствие уменьшения контракции пор, также образуются наноразмерные частицы оксида кремния, которые служат центром структурообразования при формировании цементного камня.

Таким образом, в результате введения модифицирующих добавок удалось получить бетонную смесь с повышенной подвижностью и бетон с повышенной прочностью при сжатии. Приведенные составы бетонных смесей можно использовать на практике при производстве бетонных полов, штукатурки стен и потолков, а так же в других элементах здания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комар, А.Г. Строительные материалы и изделия [Текст]: Учеб. для инж.-экон. спец. строительных вузов. – 5-е издание, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1988 – 527 с.
2. Рыбьев, И.А. Строительное материаловедение [Текст]: Учеб. пособие для строит. спец. вузов / И.А. Рыбьев. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2004. – 701 с.
3. Афанасьев, Н.Ф. Добавки в бетоны и растворы [Текст] / Н.Ф. Афанасьев, М.К. Целуйко. – К.: Будивельник, 1989. – 128 с.
4. Дуда, В. Цемент [Текст] / Пер. с нем. Е.Ш. Фельдмана; Под ред. Б.Э. Юдовича. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
5. Христофоров, А.И. Механизм структурообразования модифицированного мелкозернистого бетона [Текст] / А.И. Христофоров, И.А. Христофорова, Д.И. Кузьмин // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2011. – №1. – С. 80-84.
6. Христофоров, А.И. Мелкозернистый бетон, модифицированный органическими соединениями  $\text{Na}^+$  [Текст] / А.И. Христофоров, И.А. Христофорова, Д.И. Кузьмин // Строительство и реконструкция. – Орел: Госуниверситет – УНПК. – 2011. – №2(34). – С. 102-107.

7. ГОСТ 31108-2003. Цементы общестроительные. Технические условия [Текст].
8. ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Текст].
9. ГОСТ 10181-2000. Смеси бетонные. Общие требования [Текст].
10. ГОСТ 12871-93. Асбест хризотилковый. Общие технические условия [Текст].
11. ТУ 6-09-11-2153-94. Тетраэтоксисилан [Текст].

**Христофоров Александр Иванович**

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Владимир  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химическая технология стекла и керамики»  
Тел.: +7 920 929 01 82  
E-mail: khristoforov@mail.ru

**Христофорова Ирина Александровна**

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Владимир  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Химическая технология стекла и керамики»  
Тел.: +7 910 774 54 26  
E-mail: khristoforova-i@mail.ru

**Еропов Олег Львович**

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Владимир  
Аспирант кафедры «Химическая технология стекла и керамики»  
Тел.: +7 920 626 24 66  
E-mail: olegint@list.ru

---

A.I. KHRISTOFOROV, I.A. KHRISTOFOROVA, O.L. EROPOV

**THE CEMENT-SANDY COMPOSITION MODIFIED  
ASBESTOS AND TETRAETHYLORTHOSILICATE**

*Development of building manufacture demands perfection of physicomechanical properties of existing building materials. One of the most widespread materials is the concrete which is a reliable, strong and durable material. Updating of concrete by inorganic and organic substances, nanoparticles has the increasing development. Introduction in structure of a concrete clod-position of modifying additives leads to increase in mobility of a concrete mix to 2,5% and increase durability of concrete at compression to 60%. The increase in physicomechanical characteristics allows a floor-chat concrete of the set mark with the smaller expense of cement that allows to lower concrete cost.*

**Keywords:** asbestos, concrete, updating, organic substances.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Komar, A.G. Stroitel'nye materialy i izdelija [Tekst]: Ucheb. dlja inzh.-jekon. spec. stroitel'nyh vuzov. – 5-e izdanie, pererab. i dop. – M.: Vysshaja shkola, 1988 – 527 s.
2. Ryb'ev, I.A. Stroitel'noe materialovedenie [Tekst]: Ucheb. posobie dlja stroit. spec. vuzov / I.A. Ryb'ev. – 2-e izd., ispr. – M.: Vysshaja shkola, 2004. – 701 s.
3. Afanas'ev, N.F. Dobavki v betony i rastvory [Tekst] / N.F. Afanas'ev, M.K. Celujko. – K.: Budivjel'nyk, 1989. – 128 s.
4. Duda, V. Cement [Tekst] / Per. s nem. E.Sh. Fel'dmana; Pod red. B.Je. Judovicha. – M.: Strojizdat, 1981. – 464 s.
5. Hristoforov, A.I. Mehanizm strukturoobrazovanija modificirovannogo melkozernistogo betona [Tekst] / A.I. Hristoforov, I.A. Hristoforova, D.I. Kuz'min // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2011. – №1. – S. 80-84.
6. Hristoforov, A.I. Melkozernistyj beton, modificirovannyj organicheskimi soedinenijami Na+ [Tekst] / A.I. Hristoforov, I.A. Hristoforova, D.I. Kuz'min // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – Orel: Gosuniversitet – UNPK. – 2011. – №2(34). – S. 102-107.

7. GOST 31108-2003. Cementy obwestroitel'nye. Tehnicheskie uslovija [Tekst].
8. GOST 10180-90. Betony. Metody opredelenija prochnosti po kontrol'nym obrazcam [Tekst].
9. GOST 10181-2000. Smesi betonnye. Obwie trebovanija [Tekst].
10. GOST 12871-93. Asbest hrizotilovyj. Obwie tehnicheckie uslovija [Tekst].
11. TU 6-09-11-2153-94. Tetrajtoksisilan [Tekst].

**Hristoforov Alexander Ivanovich**

Vladimir state university of A.G. and N.G. Stoletovyh, Vladimir

Doctor of technical science, professor, head of department «Chemical technology has flown down also ceramics»

Ph.: +7 920 929 01 82

E-mail: khristoforov@mail.ru

**Hristoforova Irina Aleksandrovna**

Vladimir state university of A.G. and N.G. Stoletovyh, Vladimir

Doctor of technical science, professor of department «Chemical technology has flown down also ceramics»

Ph.: +7 910 774 54 26

E-mail: khristoforova-i@mail.ru

**Eropov Oleg Lvovich**

Vladimir state university of A.G. and N.G. Stoletovyh, Vladimir

Post-graduate student of department «Chemical technology has flown down also ceramics»

Ph.: +7 920 626 24 66

E-mail: olegint@list.ru

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫМ ПОКРЫТИЕМ

*Рассмотрены преимущества пеностекла по сравнению с другими материалами. Предложена технология получения пеностекла с защитно-декоративным слоем по лицевой поверхности при одновременном вспенивании и спекании пеностеклольной шихты и стекловидного слоя. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований получения пеностекла с защитно-декоративным слоем. Показано, что одним из основных факторов подбора стекловидного покрытия является тепловой коэффициент линейного расширения материалов, пеностекла и покрытия. Разработанная технология получения пеностекла с защитно-декоративным покрытием при одновременном вспенивании и спекании пеностеклольной шихты и стекловидного слоя позволит расширить ассортимент композиционных теплоизоляционных материалов, которые могут быть использованы в строительстве и архитектуре.*

**Ключевые слова:** пеностекло, защитно-декоративное покрытие, технология получения.

В настоящее время рынок теплоизоляционных материалов практически ограничен всего тремя типами изделий: пенопластами (26%), стекловолокном (41%) и минераловатными плитами (32%) [11]. Существующие теплоизоляционные материалы на основе неорганических соединений не обладают декоративными свойствами и поэтому при использовании их в строительных конструкциях требуют дополнительных отделочных работ, что приводит к повышению себестоимости зданий и сооружений. Недостатками таких материалов (минеральная вата, композиционные материалы на основе стекловолокна, вспученные вулканические породы, керамзит и др.) являются высокое водопоглощение и низкая прочность. К тому же некоторые материалы являются горючими и токсичными.

Сравнительный анализ современных теплоизоляционных материалов показал, что к числу наиболее эффективных относится пеностекло [2], которое является экологически безопасным материалом. Его отличает от всех используемых материалов низкая теплопроводность (0,05-0,07 Вт/м<sup>2</sup>К), химическая и биологическая устойчивость, высокая прочность при малой плотности. Перечисленные свойства дают основание говорить о конкурентной способности данного материала [1]. Однако отделочные блоки из пеностекла, используемые для теплоизоляции по лицевой поверхности зданий, требуют, аналогично другим изоляционным материалам, нанесения декоративных штукатурок или иных отделочных покрытий.

В настоящее время актуален вопрос производства пеностекла с последующим нанесением на него защитно-декоративных стекловидных покрытий. При этом появляется возможность значительно снизить затраты на монтаж фасадных систем, повысить физико-технические показатели пеностекла и его эстетические свойства [10].

Так, например, по результатам исследований, проведенных специалистами Белгородского государственного технического университета (г. Белгород, Россия) [2], касающихся технологии эмалирования изделий из пеностекла, доказано, что нанесение на поверхность защитно-декоративного неорганического силикатного покрытия повышает их прочность на 1,5-2 МПа вследствие химического взаимодействия в контактном слое стеклообразующих оксидов и оксидов-модификаторов, входящих в состав покрытия и пеностекла [8]. В частности, для нанесения на пеностекло защитно-декоративного покрытия рекомендованы эмали по алюминию.

Другое направление исследований касается применения для получения отделочных покрытий жидкого стекла совместно с различными видами измельченного боя (тарного, сортового, медицинского и листового стекла). Жидкое стекло вводят в шликер в количестве от

10 до 50 мас. %. Однако при содержании жидкого стекла 10-30 мас. % наблюдается откол верхнего слоя покрытия, поэтому рекомендуемое его содержание 40-50%. Качественное покрытие на поверхности пеностекла было получено при использовании состава, включающего бой листового стекла и жидкого стекла в массовом соотношении 100 : (40-50) [2].

Следует отметить, что работы, аналогичные исследованиям белгородских ученых, были проведены в начале 90-х гг. XX в. в Японии сотрудниками фирмы «CENTRAL GLASS CO LTD+». В частности, японскими специалистами предложено осуществлять нанесение порошка цветного стекла на поверхность пеностекла с заполнением его пор и с последующим оплавлением и охлаждением [5]. Сотрудниками фирмы предложен также способ [6] изготовления декоративного пеностекла, включающего подготовку порошка стекла, смешивание его с газообразователем, вспенивание, охлаждение, нанесение на пеностекло слоя расплавленного окрашенного стекла (эмали), которое заполняет поры материала, охлаждение.

В работе российских специалистов [7] для получения защитно-декоративных покрытий предлагается использовать как глазури, выпускаемые отечественной промышленностью, так и составы, разработанные на основе местных источников сырья и промышленных отходов, в частности, рекомендуются отходы производства санитарно-технической керамики, керамзитового производства, молотый кварцевый песок, измельченный стеклобой. В качестве связующего и плавня используется жидкое стекло.

Нанесение и закрепление защитно-декоративного покрытия на лицевой поверхности пеностекла производят преимущественно с использованием паст, эмалей, глазурей. При этом технологичность процесса производства пеностекла усложняется, так как добавляется стадия нанесения (оплавления) защитно-декоративного слоя. Данная технология при отклонении режимных параметров процесса может привести к потере прочности, изменению размеров изделий из пеностекла и внутренним напряжениям, что в свою очередь способствует ухудшению их эксплуатационных характеристик.

Нами предлагается новая технология закрепления стекловидного покрытия на поверхности пеностекла путем одновременного вспенивания и спекания пеностекольной шихты и стекловидного слоя. Достигаемая при этом экономия энергии и сокращение циклов технологического процесса производства пеностекла с защитно-декоративным стекловидным покрытием позволяют сократить затраты на производство данного вида материала, и, как следствие, снизить себестоимость готовой продукции.

Для получения образцов пеностекла с защитно-декоративным покрытием по лицевой поверхности необходимо было учесть тепловой коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материалов (пеностекла и покрытия). Как известно, ТКЛР покрытий для пеностекла должен находиться в пределах от 75 до  $105 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$  [2]. Поэтому в данной работе использовали бой листового и тарного стекла стандартного состава с ТКЛР  $85-90 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  [4].

Использовали следующий состав шихты, содержащий (мас. %): бой стекла тарного 92,0; газообразователь 4,0; сода 4,0. Соду использовали в качестве плавня для понижения температуры плавления шихты и вязкости. В качестве газообразователя для пеностекла использовали мел природный сухомолотый ММ-2. Для получения на поверхности изделия из пеностекла стекловидного слоя использовали бой тарного стекла стандартного состава [4]. Получение композиционного материала осуществляли порошковым методом [3]. Шихту для пеностекла готовили путем тонкого измельчения (до прохождения через сито 0,063) и тщательного смешивания молотого стекла, газообразователя и соды. Чем тоньше измельчена смесь и чем лучше газообразователь распределен в смеси, тем равномерней структура пеностекла и, следовательно, лучше физико-химические свойства материала.

Для вспенивания шихты использовали стальные формы размером 50×50×50 мм. Формы предварительно очищали, обмазывали по внутренней поверхности глиной для предотвращения прилипания пеностекла к металлу и помещали на огнеупорную подложку. Подготовленную шихту для пеностекла равномерно загружали в формы, заполняя 30...50% их объема, и производили уплотнение смеси. Сверху укладывали слой измельченного тарного стекла толщиной 5 мм.

Формы с шихтой и стекловидным слоем переносили в разогретую до 300°C электрическую муфельную печь для вспенивания. В камере печи формы устанавливали в зоне постоянных температур. Вспенивание проводили при температуре 950°C в течение 40 мин. Отжиг блоков пеностекла происходил при самопроизвольном охлаждении муфельной печи в течение 2 часов (график термической обработки пеностекла представлен на рисунке 1). После извлечения образцов из форм их подвергали механической обработке путем обрезки граней. Фрагмент полученного материала в разрезе представлен на рисунке 2.

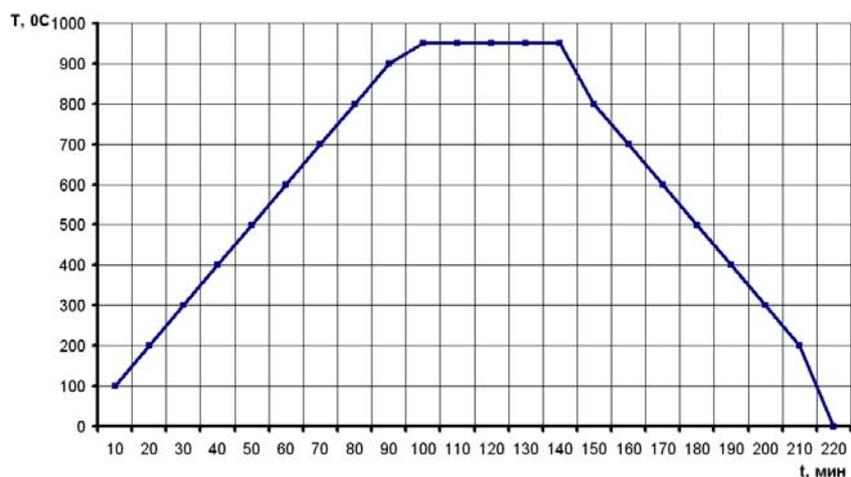


Рисунок 1 – График термической обработки пеностекла при вспенивании пеностекольной шихты и ее спекании со стекловидным слоем



Рисунок 2 – Срез образца композиционного материала (увеличение в 40 раз)

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность получения пеностекла при одновременном вспенивании и спекании пеностекольной шихты и отделочного стекловидного слоя. Это позволяет упростить технологию производства данного материала с защитно-декоративным покрытием за счет исключения отдельной стадии оплавления стекловидного покрытия, когда не исключена возможность нарушения его структуры или полного разрушения из-за внутренних напряжений, возникающих при высокой разнице температуры в зоне контакта пеностекла и стекловидного слоя.

Разработанная технология получения пеностекла с защитно-декоративным покрытием при одновременном вспенивании и спекании пеностекольной шихты и стекловидного слоя позволяет расширить ассортимент композиционных теплоизоляционных материалов, которые могут быть использованы в строительстве и архитектуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Фомглас – теплоизоляционный материал с улучшенными свойствами [Текст] // Стекло мира. – 2000. – №2. – С. 17-20.
2. Степанова, М.Н. Разработка состава и технологии теплоизоляционного композита на основе пеностекла с защитно-декоративным покрытием [Текст] / М.Н. Степанова: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Белгород, 2009. – 17 с.
3. Технология теплоизоляционных материалов [Текст]: Учебник для вузов / Ю.П. Горлов, А.П. Меркин, А.А. Устенко. – М.: Стройиздат, 1980. – 399 с.
4. Химическая технология стекла и ситаллов [Текст] / Под ред. Н.М. Павлушкина. – М.: Стройиздат, 1983. – 433 с.
5. JP (Япония) № 2038342, А, С03 С11/00. Decorative glassy cellular substance / Nogami Kenji (JP), 1990.
6. JP (Япония) № 3218934, А, С03 В 19/06, С03 С11/00. Ornamental vitreous foamed body / Nakamura Nobuo (JP), 1991.
7. Бессмертный, В.С. Пеностекло с защитно-декоративным покрытием [Текст] / В.С. Бессмертный, О.В. Пучка, В.Б. Крахт и др. // Фундаментальные исследования. – 2009. – №1. – С. 21-22.
8. Пучка, О.В. Разработка неорганических декоративно-защитных покрытий для теплоизоляционного пеностекла [Текст] / О.В. Пучка, Н.И. Минько, М.Н. Степанова // Техника и технология силикатов. – 2009. – Т. 16. – №2. – С. 9-10.
9. Пучка, О.В. Новый композиционный теплоизоляционный материал на основе пеностекла с покрытием на лицевой поверхности [Текст] / О.В. Пучка, А.А. Кузьменко, М.Н. Степанова // Известия вузов. Строительство. – 2007. – №11. – С. 53-55.
10. Щепочкина, Ю.А. Глазури для строительных материалов и изделий [Текст] / Ю.А. Щепочкина. – Минск: Книгазбор, 2010. – 136 с.
11. URL: <http://www.bestresearch.ru.html>.

**Щепочкина Юлия Алексеевна**

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный архитектурно-строительный университет», г. Иваново  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительное материаловедение и специальные технологии»  
Тел.: +7 (4932) 32-89-42

**Баканов Максим Олегович**

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный архитектурно-строительный университет», г. Иваново  
Аспирант кафедры «Строительное материаловедение и специальные технологии»  
E-mail: mask-13@mail.ru

J.A. SHCHERPOCHKINA, M.O. BACANOV

**TECHNOLOGY OF RECEPTION COMPOSITE  
HEAT-INSULATING MATERIAL  
WITH THE PROTECTIVELY-DECORATIVE COVERING**

*Advantages foamglass along with other materials are considered. The technology of reception foamglass with a protectively-decorative layer on an obverse surface is offered at simultaneous foaming and sintering of the crushed glass and a glass layer. Results theoretical and experimental researches of reception of a foamglass with a protectively-decorative layer are resulted. It is shown that one of major factors of selection of a glass covering is the thermal factor of linear expansion materials, a foamglass and a covering. The developed technology of reception of a foamglass with a protectively-decorative covering at simultaneous foaming and sintering of a powder of a foamglass and a glass layer will allow to expand assortment composite heat-insulating materials which can be used in building and architecture.*

**Keywords:** a foamglass; a protectively-decorative covering; technology of reception.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Fomglas – teploizoljacionnyj material s uluchshennymi svojstvami [Tekst] // Steklo mira. – 2000. – №2. – S. 17-20.
2. Stepanova, M.N. Razrabotka sostava i tehnologii teploizoljacionnogo kompozita na osnove penostekla s zavitno-dekorativnym pokrytiem [Tekst] / M.N. Stepanova: Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. – Belgorod, 2009. – 17 s.
3. Tehnologija teploizoljacionnyh materialov [Tekst]: Uchebnik dlja vuzov / Ju.P. Gorlov, A.P. Merkin, A.A. Ustenko. – M.: Strojizdat, 1980. – 399 s.
4. Himicheskaja tehnologija stekla i sitallov [Tekst] / Pod red. N.M. Pavlushkina. – M.: Strojizdat, 1983. – 433 s.
5. JP (Japonija) № 2038342, A, S03 S11/00. Decorative glassy cellular substance / Nogami Kenji (JP), 1990.
6. JP (Japonija) № 3218934, A, S03 V 19/06, S03 S11/00. Ornamental vitreous foamed body / Nakamura Nobuo (JP), 1991.
7. Bessmertnyj, V.S. Penosteklo s zavitno-dekorativnym pokrytiem [Tekst] / V.S. Bessmertnyj, O.V. Puchka, V.B. Kraht i dr. // Fundamental'nye issledovanija. – 2009. – №1. – S. 21-22.
8. Puchka, O.V. Razrabotka neorganicheskikh dekorativno-zavitnyh pokrytij dlja teploizoljacionnogo penostekla [Tekst] / O.V. Puchka, N.I. Min'ko, M.N. Stepanova // Tehnika i tehnologija silikatov. – 2009. – T. 16. – №2. – S. 9-10.
9. Puchka, O.V. Novyj kompozicionnyj teploizoljacionnyj material na osnove penostekla s pokrytiem na licevoj poverhnosti [Tekst] / O.V. Puchka, A.A. Kuz'menko, M.N. Stepanova // Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. – 2007. – №11. – S. 53-55.
10. Wepochkina, Ju.A. Glazuri dlja stroitel'nyh materialov i izdelij [Tekst] / Ju.A. Wepochkina. – Minsk: Knigazbor, 2010. – 136 s.
11. URL: <http://www.bestresearch.ru.html>.

**Shchepochkina Julia Alekseevna**

Ivanovo state architecture and construction university, Ivanovo

Doctor of technical science, professor of department «Building materials technology and special technologies»

Ph.: +7 (4932) 32-89-42

**Bacanov Maksim Olegovich**

Ivanovo state architecture and construction university, Ivanovo

Post-graduate student of department «Building materials technology and special technologies»

E-mail: mask-13@mail.ru

**Рецензия на монографию**  
**«Механика грунтов в решении геотехнических задач»**  
**(авторы: Булгаков А.Г., Дыба В.П., Скибин Г.М.)**

Монография состоит из предисловия, тринадцати глав, заключения и списка литературы. Объем книги – 326 машинописных листов.

Рецензируемая работа посвящена расчету фундаментов и их оснований по первому предельному состоянию (Ultimate Limit State), а также связанным с предельным состоянием грунта вопросам бестраншейной прокладки коммуникаций.

Отличительной особенностью рассматриваемой работы является широкое применение в задачах механики грунтов предельного анализа пластических систем, выросшего из двух теорем А.А. Гвоздева. Это позволило найти нижние и верхние оценки несущей способности пластической системы «железобетонный фундамент – грунтовое основание».

Нижние и верхние оценки несущей способности образуют «коридор», в который обязана попадать неизвестная несущая способность. Открывается актуальная возможность контроля численных экспериментов, проводимых с помощью различных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов. Если рассчитанный график «нагрузка – осадка» попадает в «коридор», то нет причины отвергать численные результаты. В противном случае численные результаты следует отбрасывать.

Наряду с теоретическими исследованиями монография содержит результаты лотковых экспериментальных исследований напряженно – деформированного состояния плотного песчаного основания под моделями фундаментов.

Книга содержит сведения о технологии прокладки бестраншейных коммуникаций различными способами.

Монография будет полезна специалистам в области механики грунтов и фундаментостроения, проектировщикам зданий и сооружений. Она может быть использована преподавателями при чтении лекций по «Механике грунтов» и по курсу «Основания и фундаменты».

Заслуженный работник ВШ РФ,  
проректор по научной работе, заведующий  
кафедрой «Гидротехнические и земляные  
сооружения» ВолгГАСУ, академик РАН,  
советник РААСН, профессор, доктор  
технических наук

Доктор геолого-минералогических наук,  
профессор кафедры ГЗС ВолгГАСУ

  
А.Н. Богомолов  
  
Ю.И. Олянский

**Уважаемые авторы!**  
**Просим Вас ознакомиться с основными требованиями**  
**к оформлению научных статей**

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах **формата А4** и содержит от **4 до 9 страниц**; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья должна быть набрана шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.
- Статья предоставляется в **1 экземпляре** на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного автора**, включая соавторство.
- **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.**
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

**В тексте статьи** не рекомендуется применять:

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

**Обязательные элементы:**

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** описывает цели и задачи проведенного исследования, а также возможности его практического применения, указывает, что нового несет в себе материал; рекомендуемый средний объем – 500 печатных знаков;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи.

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

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

---

*Адрес учредителя журнала*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет –  
учебно-научно-производственный комплекс»  
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)  
302020, г. Орел, ул. Наугорское шоссе, 29  
+7 (4862) 42-00-24  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: unpk@ostu.ru

*Адрес редакции*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет –  
учебно-научно-производственный комплекс»  
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)  
302020, г. Орел, ул. Московская, 77.  
+7 (4862) 73-43-49  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: oantc@mail.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

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

Технический редактор С.В. Солопов  
Компьютерная верстка С.В. Солопов

Подписано в печать 25.05.2012 г.

Формат 70×108 1/16. Печ. л. 3,33.

Тираж 400 экз.

Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической  
базе ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.