



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

**№1 (45) 2013**  
**(январь-февраль)**

# СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

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

## Редакционный совет:

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

## Главный редактор:

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

## Заместители главного редактора:

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

## Редколлегия:

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

## Ответственный за выпуск:

Солопов С.В. к.т.н.

## Адрес редакции:

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

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

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

© ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2013

## Содержание

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

- Коробко А.В., Прокуров М.Ю.** Построение граничных аппроксимирующих функций максимального прогиба пластинок с комбинированными граничными условиями для использования в методе интерполяции по коэффициенту формы..... 3
- Коробко В.И., Савин С.Ю.** Свободные колебания прямоугольных ортотропных пластинок с однородными и комбинированными граничными условиями..... 13
- Май Дык Минь.** Расчет тоннелей, расположенных в упругопластических грунтах, пересекающих зоны разлома, на сейсмические воздействия..... 19
- Осовских Е.В., Колчунов В.И., Афонин П.А.** Деформирование, трещинообразование и разрушение эксплуатируемых железобетонных складчатых покрытий в предельных и запредельных состояниях..... 26
- Турков А.В., Макаров А.А.** Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных балок на квадратном плане с учетом податливости узловых соединений..... 33

### **Архитектура и градостроительство**

- Бакаева Н.В., Шишкина И.В.** Критерий экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства на основе биосферосовместимых технологий..... 37
- Бударин Е.Л.** Архитектура загородного индивидуального жилища, его типы и развитие на юге России..... 47
- Кобелева С.А.** Об экологических требованиях к объектам недвижимости.. 57

### **Строительные материалы и технологии**

- Батракова А.Г.** Позиционирование и идентификация подповерхностных дефектов в конструктивных слоях дорожных одежд..... 62
- Илиополов С.К., Чернов С.А., Мардиросова И.В., Еременко Е.А.** Исследование процессов старения вязких дорожных битумов и некоторые аспекты их снижения..... 69
- Канаев А.Ю., Христофорова И.А., Христофоров А.И.** Теплоизоляционные пеноалюмосиликаты..... 76
- Соломенцев А.Б.** Адгезионные добавки для дорожных битумов и асфальтобетонов и оценка их эффективности..... 81
- Федосова Н.Л., Румянцева В.Е., Шестеркин М.Е., Манохина Ю.В.** О некоторых особенностях моделирования массопереноса в процессах коррозии первого вида бетона в замкнутой системе «резервуар – жидкость»..... 86

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.

**№1 (45) 2013**  
**(January-February)**

# BUILDING AND RECONSTRUCTION

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

## Editorial council:

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

## Editor-in-chief

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

## Editor-in-chief assistants:

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

## Editorial committee

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

## Responsible for edition:

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

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

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

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»  
86294

© State University ESPC, 2013

## Contents

### Theory of engineering structures.

#### Building units

- Korobko A.V., Prokurov M.Yu.** Plotting of boundary approximating  
functions of plates maximum deflection with integrated boundary conditions  
for application in interpolation method by form ratio..... 3
- Korobko V.I., Savin S.Ju.** Free vibration of the rectangular orthotropic plate  
with homogeneous and combined boundary conditions..... 13
- Mai Duc Minh.** Seismic analysis of tunnels crossing the fault zone in elasto-  
plastic soils..... 19
- Osovskih E.V., Kolchunov V.I., Afonin P.A.** Straining, crack growth and  
failure of operating reinforced concrete prismatic folded roofs in limit and  
out-of-limit states..... 26
- Turkov A.V., Makarov A.A.** Deflections and frequencies of own fluctuations  
of systems cross beams on the square plan taking into account pliability of  
nodal connections..... 33

### Architecture and town-planning

- Bakaeva N.V., Shishkina I.V.** The basic directions of maintenance of  
ecological safety of the motor transportation infrastructure of municipal economy  
on the basis of biospheric compatibility technologies..... 37
- Budarin E.L.** Architecture of country houses, their types and development in  
southern Russia..... 47
- Kobeleva S.A.** About ecological requirements to real estate objects..... 57

### Construction materials and technologies

- Batrakova A.G.** Positioning and identification of subsurface defects in  
constructive layers of pavement..... 62
- Ilioplov S.K., Chernov S.A., Mardirosova I.V., Eremenko E.A.** Study of  
the processes of aging of viscous bitumen and some aspects of their reduction. 69
- Kanaev A.Y., Khristoforova I.A., Khristoforov A.I.** Heat-insulating foam  
aluminosilicates..... 76
- Solomentsev A.B.** Bonding additives for bitumen and asphalt-concrete road  
covers and evaluation of their effectiveness..... 81
- Fedosova N.L., Rumyantseva V.Ye., Shesterkin M.E., Manokhina Yu.V.**  
On some peculiarities mass transfer modeling in the processes of the first  
type of corrosion of cement concrete in closed system «tank - liquid»..... 86

УДК 624.044.2:62-41:510.67

КОРОБКО А.В., ПРОКУРОВ М.Ю.

## **ПОСТРОЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ АППРОКСИМИРУЮЩИХ ФУНКЦИЙ МАКСИМАЛЬНОГО ПРОГИБА ПЛАСТИНОК С КОМБИНИРОВАННЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МЕТОДЕ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ФОРМЫ**

*В статье приводится построение граничных кривых «максимальный прогиб – коэффициент формы» путем аппроксимации решений, полученных с помощью программных комплексов на основе МКЭ, для упругих изотропных пластинок в виде равнобедренных и прямоугольных треугольников, ромбов, прямоугольников, правильных многоугольников и эллипсов, имеющих комбинированные граничные условия шарнирного опирания и жесткого защемления. Эти кривые предназначены для выбора «опорных решений» в методе интерполяции по коэффициенту формы.*

**Ключевые слова:** упругие пластинки, равномерно распределенная нагрузка, максимальный прогиб, коэффициент формы, аппроксимирующая функция.

Развитие технической теории расчета пластинок, применяемых в качестве несущих и ограждающих конструкций объектов строительства и машиностроения, связано с разработкой простых аналитических методов, позволяющих проводить оперативную оценку их технического состояния. Одним из таких методов является метод интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ), подробно изложенный в монографии [1].

Коэффициентом формы плоской замкнутой области является безразмерная геометрическая характеристика, в общем виде представляющая собой контурный интеграл:

$$K_f = \oint_L \frac{ds}{h},$$

где  $ds$  – линейный элемент контура  $L$ ;  $h$  – перпендикуляр, опущенный на него из некоторого полюса, расположенного внутри рассматриваемой области.

Максимальный прогиб упругих пластинок различной формы и с комбинированными граничными условиями (комбинации шарнирного опирания и жесткого защемления по сторонам) представляется в виде следующей зависимости:

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

где  $q$  – интенсивность равномерной нагрузки, распределенной по всей площади пластинки  $A$ ;  $D$  – цилиндрическая жесткость пластинки;  $k_w = f(K_f)$  – коэффициент пропорциональности, рассматриваемый как некоторая функция коэффициента формы пластинки. Построению таких функций для пластинок характерных видов посвящена настоящая статья.

Значения коэффициентов формы пластинок характерных очертаний определялись с помощью авторской программы KfGeometry\*. Значения  $k_w$  для рассматриваемых пластинок предварительно определялись с использованием универсальных программных пакетов, реализующих МКЭ, а также других программных разработок, прошедших успешное тестирование†.

Построение аппроксимирующих зависимостей выполнено с использованием пакета специализированного математического обеспечения TableCurve 2D.

\* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610432 от 10.01.2012 г.

† Решения получены аспирантом А.А. Черняевым.

Аппроксимирующие функции получены в виде следующих выражений:

$$k_w = a + \frac{b}{K_f} + \frac{c}{K_f^2} + \frac{d}{K_f^3} + \frac{e}{K_f^4} + \frac{f}{K_f^5} + \frac{g}{K_f^6} + \frac{h}{K_f^7} + \frac{i}{K_f^8}; \quad (1)$$

$$k_w = \frac{a + c K_f + e K_f^2 + g K_f^3 + i K_f^4}{1 + b K_f + d K_f^2 + f K_f^3 + h K_f^4 + j K_f^5}. \quad (2)$$

### Пластинки в виде равнобедренных треугольников

Возможные комбинации граничных условий пластинок в виде равнобедренных треугольников представлены на рисунке 1.

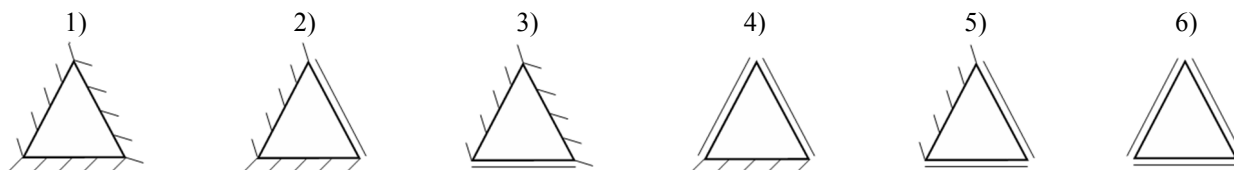


Рисунок 1 – Комбинации граничных условий пластинок в виде равнобедренных треугольников

В работе [2] установлено, что для аппроксимации прогибов пластинок в виде равнобедренных треугольников с комбинированными граничными условиями в виде жесткого защемления и шарнирного опирания необходимо применять две отдельные функции при соответствующих значениях угла при основании:  $\alpha \leq 60^\circ$  и  $\alpha \geq 60^\circ$ . В первом случае основание является большей стороной пластинки, во втором – меньшей. При этом его жесткое защемление или шарнирное опирание будет придавать большую или меньшую жесткость пластинке, влияя на величину ее максимального прогиба. В связи с этим, для каждой из схем с комбинированными граничными условиями (2...5) приняты по две различные аппроксимирующие функции вида (2). Для схем (1, 6) аппроксимирующие выражения имеют вид (1). Ниже приведены коэффициенты указанных выражений\*.

#### Схема 1

$a = -0,049927937$ ;  $b = 11,084046$ ;  $c = -809,67568$ ;  $d = 38422,213$ ;  $e = -840877,13$ ;  $f = 9897110,8$ ;  $g = -60146861$ ;  $h = 1,4841396e+08$ .

#### Схема 2

При  $\alpha \leq 60^\circ$ ,  $a = -1,9043212$ ;  $b = -0,4004001$ ;  $c = 0,35989592$ ;  $d = 0,048480261$ ;  $e = -0,019666514$ ;  $f = -0,0020437796$ ;  $g = 0,00026221775$ ;  $h = 2,2986562e-05$ ;  $i = -2,238883e-06$ ;  $j = -5,3168222e-07$ .

При  $\alpha \geq 60^\circ$ ,  $a = -1,4268865$ ;  $b = -0,28774735$ ;  $c = 0,16640241$ ;  $d = 0,018697253$ ;  $e = -0,0024531314$ .

#### Схема 3

При  $\alpha \leq 60^\circ$ ,  $a = 14,973112$ ;  $b = 1,6064138$ ;  $c = -0,27244238$ ;  $d = -0,48714374$ ;  $e = -1,3587955$ ;  $f = 0,024047661$ ;  $g = 0,12257589$ ;  $h = -0,0035087921$ ;  $i = 0,00010331233$ ;  $j = 0,00042946365$ .

При  $\alpha \geq 60^\circ$ ,  $a = -5,9260316$ ;  $b = -0,53466972$ ;  $c = 0,6938405$ ;  $d = 0,043734534$ ;  $e = -0,0098823391$ .

#### Схема 4

При  $\alpha \leq 60^\circ$ ,  $a = 1,5816607$ ;  $b = -0,19897686$ ;  $c = 0,072367924$ ;  $d = 0,030668682$ ;  $e = -0,029739718$ ;  $f = -0,00193151$ ;  $g = 0,00032443199$ ;  $h = -2,8922565e-05$ .

При  $\alpha \geq 60^\circ$ ,  $a = -3,2910319$ ;  $b = -0,32976551$ ;  $c = 0,37402356$ ;  $d = 0,022545609$ ;  $e = -0,0053737352$ .

\* Здесь и далее приводятся отличные от нуля значения коэффициентов выражений (1) и (2).

Схема 5

При  $\alpha \leq 60^\circ$ ,  $a = -2,1632959$ ;  $b = 0,02143883$ ;  $c = -0,66116675$ ;  $d = -0,073539835$ ;  $e = 0,12030563$ ;  $f = 0,0072621277$ ;  $g = -0,0011570045$ ;  $h = -7,0434617e-06$ .

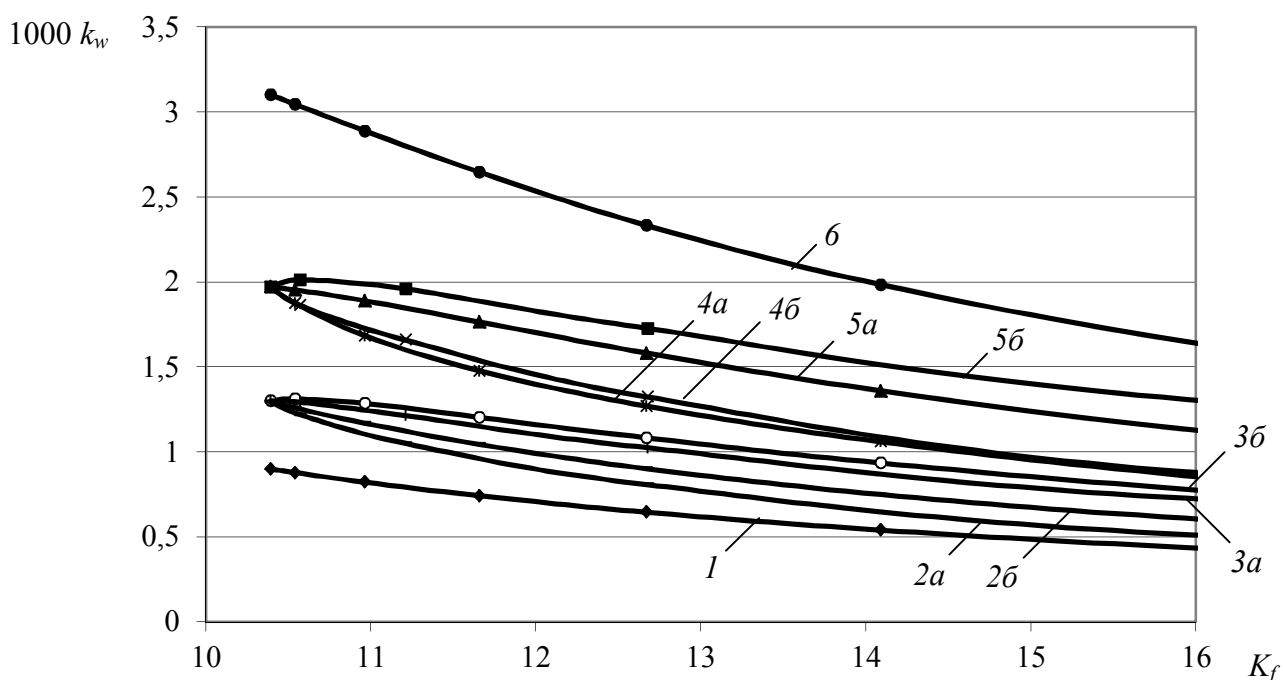
При  $\alpha \geq 60^\circ$ ,  $a = 35,676237$ ;  $b = 1,1076973$ ;  $c = -4,0870887$ ;  $d = -0,11989612$ ;  $e = 0,054960378$ .

Схема 6

$a = 0,045162364$ ;  $b = -18,339451$ ;  $c = 3092,1539$ ;  $d = -149570,6$ ;  $e = 4789648,5$ ;  $f = -91705540$ ;  $g = 1,0101702e+09$ ;  $h = -5,8820529e+09$ ;  $i = 1,3981893e+10$ .

Расхождения значений, вычисленных с помощью найденных функций, с тестовыми решениями не превышают 1,9%.

Графики аппроксимирующих функций приведены на рисунке 2.



*a* – при основании треугольника угол  $\alpha \leq 60^\circ$ ; *б* – угол  $\alpha \geq 60^\circ$

**Рисунок 2 – Графики аппроксимирующих функций  $w_0 - f(K_f)$  для пластинок в виде равнобедренных треугольников (номер кривой соответствует номеру схемы)**

Минимально возможное значение коэффициента формы  $K_f = 10,392$  соответствует пластинкам в виде равностороннего треугольника. Для таких пластинок схемы 2, 3 и 4, 5 совпадают, поэтому соответствующие аппроксимирующие кривые выходят из общих точек. Симметрия схем (3, 4) позволяет с некоторой потерей точности применить к их описанию единственную функцию вида (1), как это сделано для схем 1 и 6.

### Пластинки в виде прямоугольных треугольников

Возможные комбинации рассматриваемых граничных условий пластинок в виде прямоугольных треугольников представлены на рисунке 3. Аппроксимирующие функции описываются уравнением (1). Графики этих функций приведены на рисунке 4.

Схема 1

$a = 0,078218059$ ;  $b = -6,1918739$ ;  $c = 314,50072$ ;  $d = -2577,071$ ;  $e = 9296,0973$ .

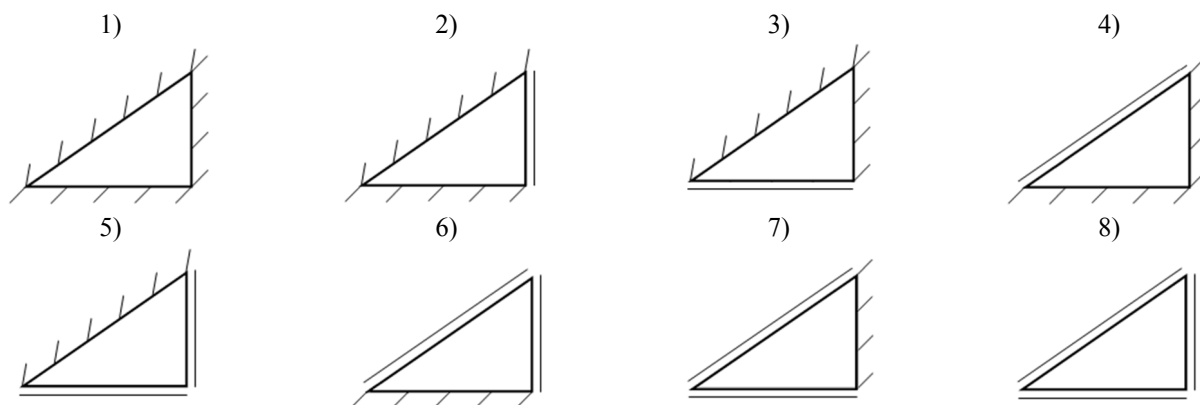


Рисунок 3 – Комбинации граничных условий пластинок в виде прямоугольных треугольников

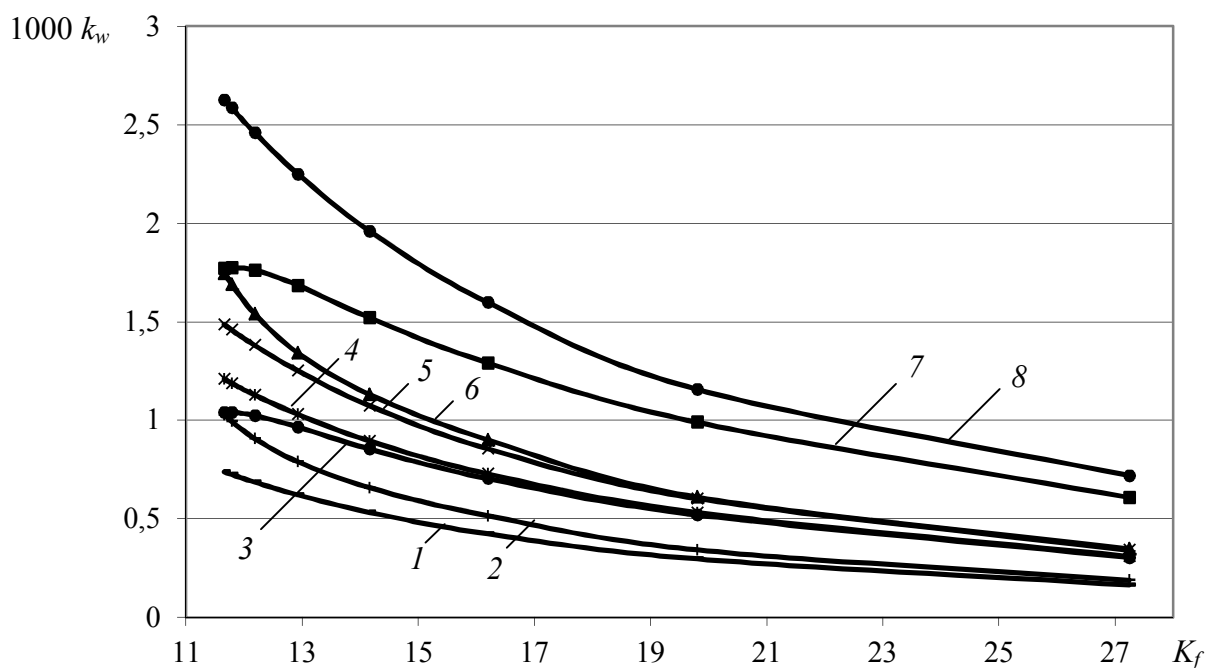


Рисунок 4 – Графики аппроксимирующих функций  $w_0 - f(K_f)$  для пластинок в виде прямоугольных треугольников (номер кривой соответствует номеру схемы)

Схема 2

$a = 2,6294265$ ;  $b = -193,26085$ ;  $c = 5321,7169$ ;  $d = -60319,239$ ;  $e = 256544,82$ .

Схема 3

$a = 5,9848971$ ;  $b = -549,90958$ ;  $c = 20084,561$ ;  $d = -351183,99$ ;  $e = 3029007,5$ ;  $f = -10312723$ .

Схема 4

$a = 5,166855$ ;  $b = -526,80227$ ;  $c = 22128,571$ ;  $d = -473428,14$ ;  $e = 5609333,9$ ;  $f = -34869791$ ;  $g = 89025019$ .

Схема 5

$a = -0,17269045$ ;  $b = 16,134702$ ;  $c = -291,18269$ ;  $d = 9241,435$ ;  $e = -91713,057$ ;  $f = 333622,18$ .

Схема 6

$a = 5,3922164$ ;  $b = -396,7887$ ;  $c = 10930,583$ ;  $d = -124782,26$ ;  $e = 530492,71$ .

Схема 7

$a = 10,714054; b = -982,571; c = 35962,638; d = -628408,76; e = 5401615,8;$   
 $f = -18322488.$

Схема 8

$a = 6,335615; b = -514,32178; c = 17072,791; d = -262266,56; e = 2000383,7;$   
 $f = -6025231,6.$

Расхождения значений, вычисленных с помощью принятых функций, с тестовыми решениями не превышают 1,4%.

Область определения построенных функций ограничена слева минимальным значением  $K_f = 11,657$ , соответствующим пластинке в виде прямоугольного равнобедренного треугольника, для которого схемы 2 и 3, как и схемы 6 и 7, совпадают. Для пластинок в виде вытянутых треугольников характерно приближение значений прогибов для отдельных схем, мало отличающихся друг от друга условиями контурного опирания.

### Ромбические пластинки

Возможные комбинации граничных условий пластинок в виде ромбов представлены на рисунке 5. Аппроксимирующие функции описываются уравнением (1).

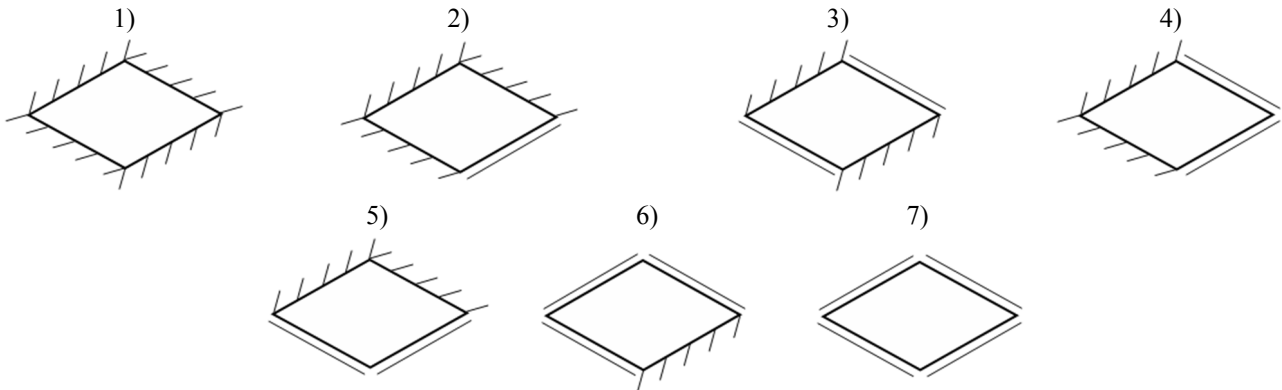


Рисунок 5 – Комбинации граничных условий ромбических пластинок

Схема 1

$a = -0,10724044; b = 9,7212153; c = -184,04082; d = 4627,6222; e = -39372,702;$   
 $f = 117993,09.$

Схема 2

$a = -0,11319062; b = 10,149093; c = -146,46433; d = 5958,8324; e = -92954,164;$   
 $f = 834241,26; g = -4152724,2; h = 8747905,6.$

Схема 3

$a = 0,043984242; b = -5,1557508; c = 447,57043; d = -6106,718; e = 73159,042;$   
 $f = -631718,39; g = 3138483,8; h = -6522852,8.$

Схема 4

$a = -0,22641083; b = 24,997124; c = -811,21621; d = 25974,583; e = -421497,17;$   
 $f = 3927927,6; g = -19835855; h = 41823788.$

Схема 5

$a = -0,32787618; b = 33,762719; c = -880,10599; d = 22225,583; e = -301456,99;$   
 $f = 2343331,5; g = -9788836,4; h = 16939416.$

Схема 6

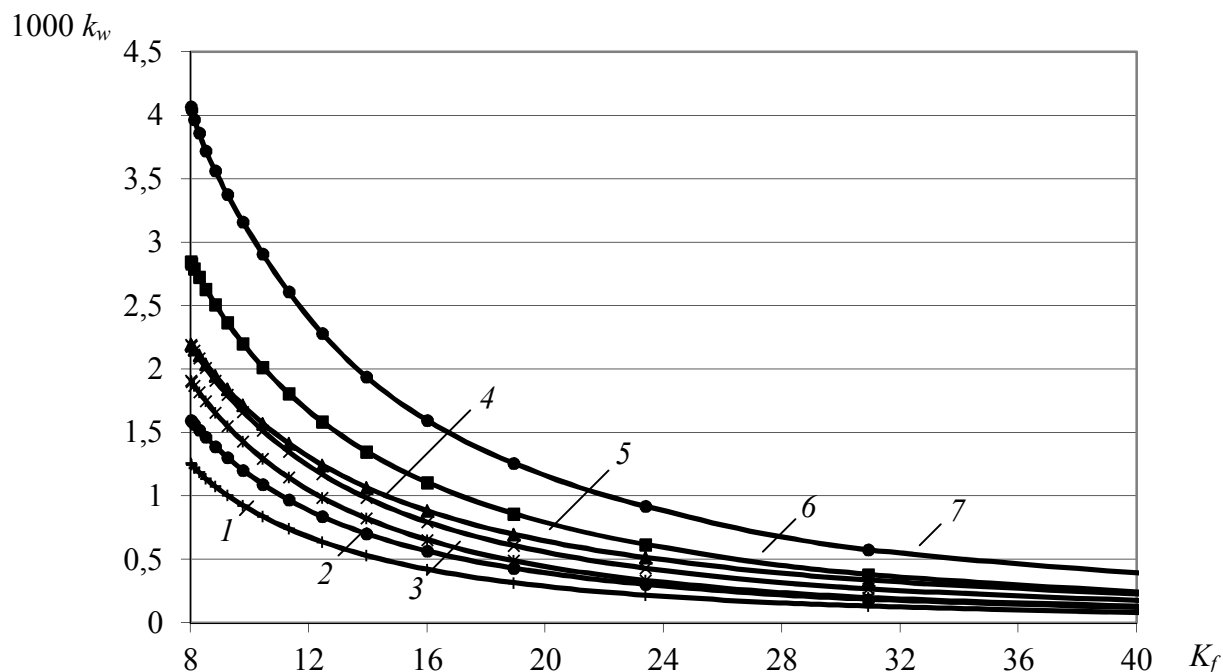
$a = -0,036200775; b = -12,687423; c = 1839,9703; d = -57544,398; e = 1126793,3;$   
 $f = -13560469; g = 97959095; h = -3,906293e+08; i = 6,6157631e+08.$

Схема 7

$a = 0,88300609$ ;  $b = -112,8218$ ;  $c = 6242,9778$ ;  $d = -137445,38$ ;  $e = 1628405,5$ ;  
 $f = -9733666,4$ ;  $g = 22984370$ .

Расхождения значений, вычисленных с помощью найденных функций, с тестовыми решениями не превышают 2,7%.

Графики аппроксимирующих функций приведены на рисунке 6.



*Рисунок 6 – Графики аппроксимирующих функций  $w_0 - f(K_f)$  для ромбических пластинок (номер кривой соответствует номеру схемы)*

Область определения построенных функций ограничена слева минимальным значением  $K_f = 8$ , соответствующим квадратной пластинке. В связи с этим, аппроксимирующие кривые 4 и 5 выходят из одной общей точки, поскольку для квадратной пластинки соответствующие схемы совпадают.

Для достаточно вытянутых ромбических пластинок граничные условия отдельных сторон контура в меньшей мере сказываются на их жесткости, что видно на графиках, построенных для схем 2, 3 и 5, 6. При больших значениях коэффициента формы графики указанных функций практически сливаются.

### Прямоугольные пластинки

Возможные комбинации граничных условий для пластинок в виде прямоугольников представлены на рисунке 7. Аппроксимирующие функции для схем 1, 5 и 9 описываются уравнением (1), а для схем 2...4, 6...8 – уравнением (2). Графики полученных аппроксимирующих функций приведены на рисунке 8.

Схема 1

$a = -0,32600066$ ;  $b = 37,952667$ ;  $c = -1733,0429$ ;  $d = 43977,511$ ;  $e = -629521,21$ ;  
 $f = 5267819,1$ ;  $g = -23654051$ ;  $h = 44448297$ .



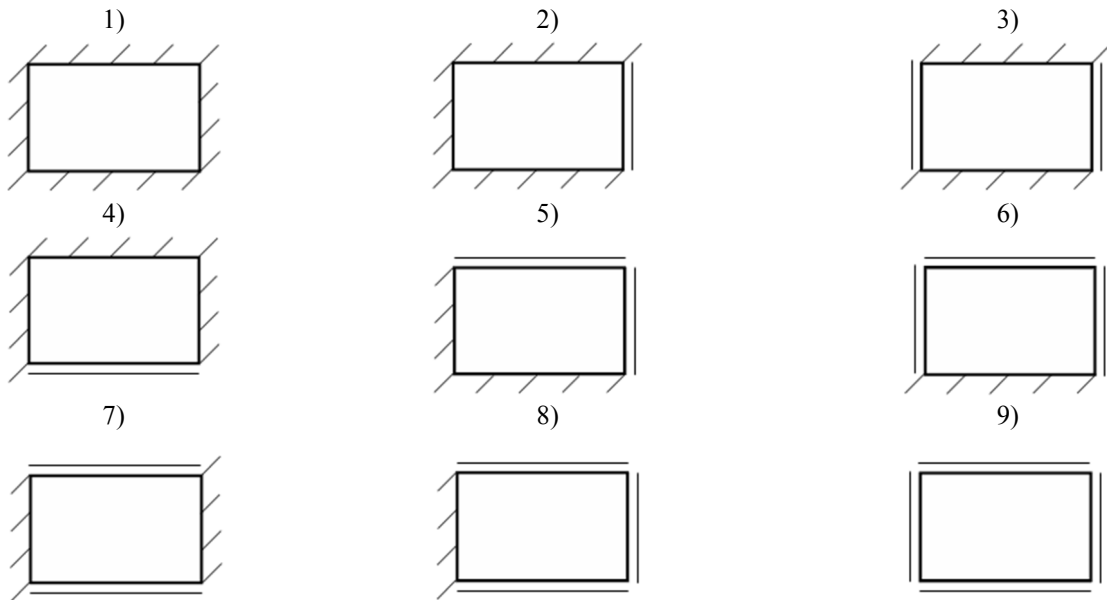


Рисунок 7 – Комбинации граничных условий для прямоугольных пластинок

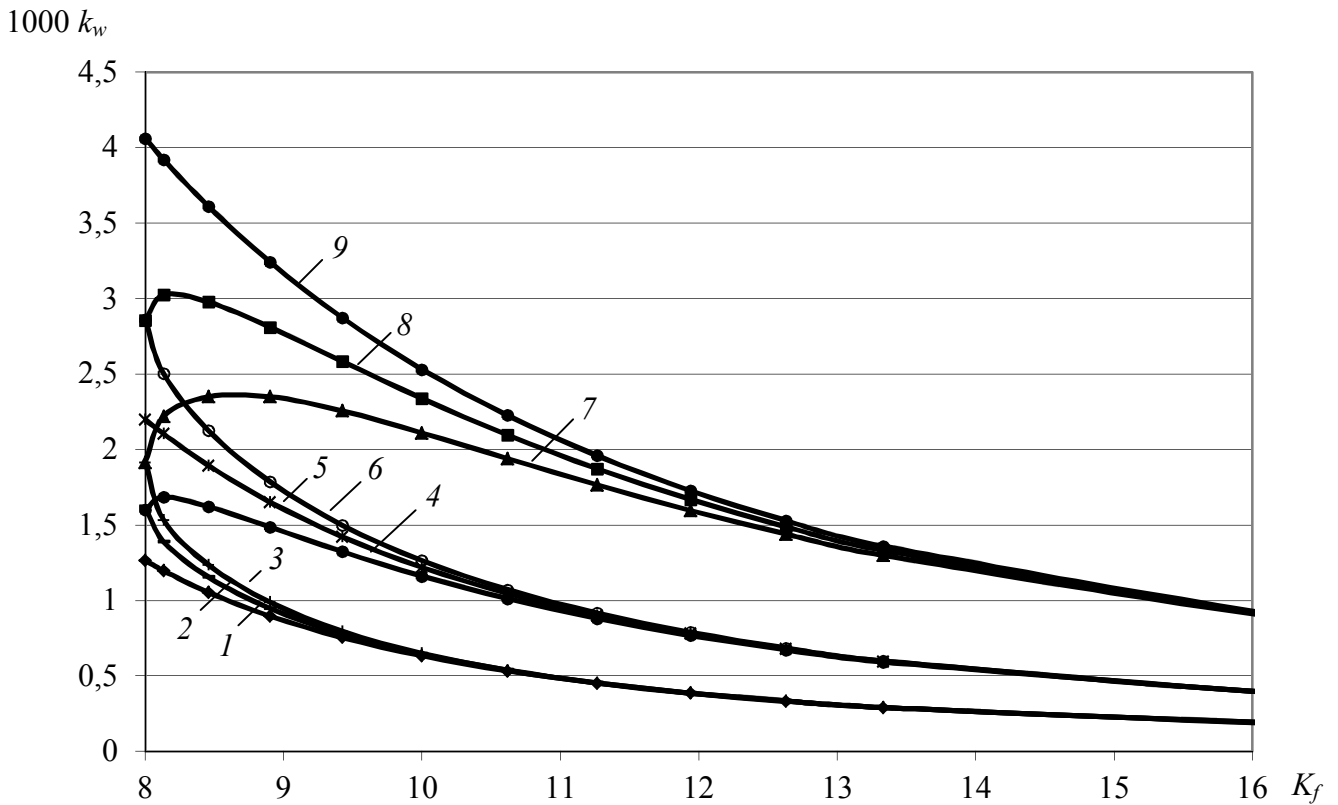


Рисунок 8 – Графики аппроксимирующих функций  $w_0 - f(K_f)$  для прямоугольных пластинок (номер кривой соответствует номеру схемы)

Схема 2

$a = 0,46483467$ ;  $b = -0,66194165$ ;  $c = -0,067479797$ ;  $d = 0,16542053$ ;  $e = -0,0062244325$ ;  
 $f = -0,018190851$ ;  $g = 0,0010080664$ ;  $h = 0,00073787769$ ;  $i = -1,0435328e-05$ .

Схема 3

$a = -0,0062820794$ ;  $b = -0,56036804$ ;  $c = 0,086370764$ ;  $d = 0,099342751$ ;  $e = -0,012048769$ ;  
 $f = -0,0056200214$ ;  $g = 0,00015962218$ .

Схема 4

$a = 1,7383382$ ;  $b = -0,57308991$ ;  $c = -0,42024418$ ;  $d = 0,13655223$ ;  $e = 0,019709334$ ;  
 $f = -0,015339158$ ;  $g = 0,0007561362$ ;  $h = 0,00065907898$ ;  $i = -5,8652835e-06$ .

Схема 5

$a = -0,24793661$ ;  $b = 25,709228$ ;  $c = -927,52784$ ;  $d = 19774,362$ ;  $e = -201381,53$ ;  
 $f = 1086378,8$ ;  $g = -2329128,4$ .

Схема 6

$a = 34,840592$ ;  $b = -2,7916165$ ;  $c = -8,7099935$ ;  $d = 1,2171622$ ;  $e = 0,5056177$ ;  
 $f = -0,18294569$ ;  $g = 0,0051351304$ ;  $h = 0,0090587579$ ;  $i = -3,5119844e-05$ .

Схема 7

$a = 3,3726793$ ;  $b = -0,44808616$ ;  $c = -0,87112967$ ;  $d = 0,087564006$ ;  $e = 0,054042255$ ;  
 $f = -0,0090163519$ ;  $g = 0,00027141483$ ;  $h = 0,00039005671$ ;  $i = 1,0810319e-08$ .

Схема 8

$a = 8,1927836$ ;  $b = -0,48788399$ ;  $c = -2,2214868$ ;  $d = 0,11864115$ ;  $e = 0,15350658$ ;  
 $f = -0,015345952$ ;  $g = -0,00054732842$ ;  $h = 0,00077371783$ ;  $i = 9,9071673e-06$ .

Схема 9

$a = -0,15222442$ ;  $b = 17,186568$ ;  $c = -559,24696$ ;  $d = 17718,836$ ;  $e = -223108,35$ ;  
 $f = 1743383,5$ ;  $g = -7788119$ ;  $h = 15037698$ .

Расхождения значений, вычисленных с помощью найденных функций, с тестовыми решениями не превышают 4,8%.

Как и для ромбических пластинок, область определения построенных аппроксимирующих функций для прямоугольных пластинок ограничена слева значением  $K_f = 8$ , соответствующим квадратной пластинке. Для этого значения  $K_f$  наблюдается парное совпадение  $w_0$  для схем 2 и 4, 3 и 7, 6 и 8. Слияние графиков, наблюдаемое с ростом значения коэффициента формы, показывает, что граничные условия закрепления отдельных сторон в меньшей мере оказывают влияние на жесткость вытянутых прямоугольных пластинок.

### Пластинки в виде правильных многоугольников

Ввиду изначальной неопределенности возможного числа сторон, для пластинок в виде правильных многоугольников приняты к рассмотрению однородные граничные условия в виде жестко защемленного контура и шарнирного опирания. При этом обе аппроксимирующие функции описываются уравнениями вида (2).

Жесткое защемление:  $a = 4,8659135$ ;  $b = -0,11271222$ ;  $c = -1,6569034$ ;  $d = -0,031714433$ ;  
 $e = 0,17173439$ ;  $f = 0,0039370028$ ;  $g = -0,0048738205$ .

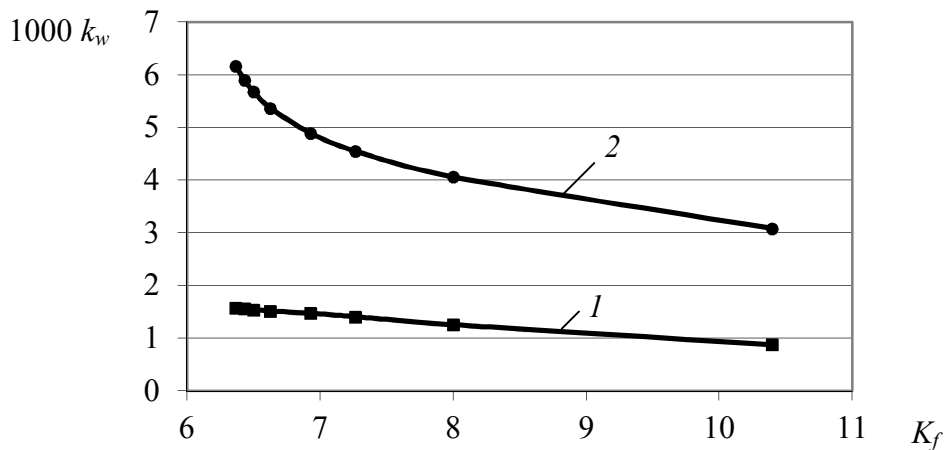
Шарнирное опирание:  $a = 5,6040952$ ;  $b = -0,019363095$ ;  $c = -0,17294052$ ;  
 $d = -0,00026967597$ .

Расхождения значений, вычисленных с помощью найденных функций, с тестовыми решениями не превышают 1,2%.

Графики рассматриваемых аппроксимирующих функций приведены на рисунке 9.

Область определения построенных аппроксимирующих функций представляет собой интервал  $[2\pi; 10,392]$ , у которого левая граница соответствует круглой пластинке (или пластинке в виде правильного многоугольника с бесконечным числом сторон), а правая – пластинке в виде равностороннего треугольника. При этом аргументами полученных функций являются дискретные значения коэффициента формы, соответствующие правильным многоугольникам.

Анализ обоих графиков показывает, что при шарнирном опирании область возможных значений максимальных прогибов пластинок в виде правильных многоугольников в среднем в 3 раза шире, чем при жестком защемлении их контура.



1 – жесткое защемление; 2 – шарнирное опирание

Рисунок 9 – Графики аппроксимирующих функций  $w_0 - f(K_f)$  для пластинок в виде правильных многоугольников

### Эллипсы

График аппроксимирующей функции для эллипсов приведен на рисунке 10.

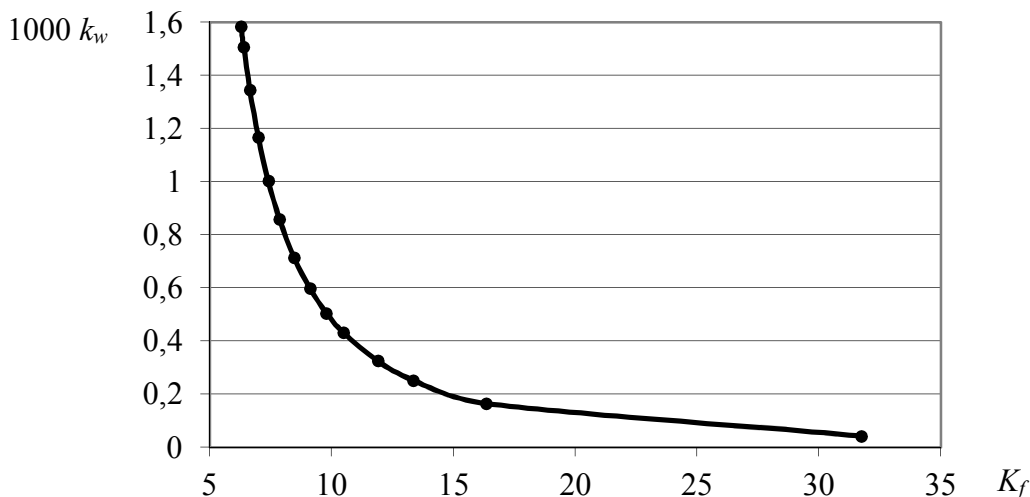


Рисунок 10 – График аппроксимирующей функции  $w_0 - f(K_f)$  для эллиптической пластинки, жестко защемленной по контуру

Для пластинок в виде эллипсов в качестве граничных условий рассмотрено жесткое защемление по опорному контуру. Данное ограничение введено в связи с тем, что прогибы шарнирно опертых криволинейных пластинок зависят также от коэффициента Пуассона, что не предусмотрено постановкой данной исследовательской задачи.

Аппроксимирующая функция в этом случае имеет вид (1) при следующих значениях используемых коэффициентов:  $a = 0,014224046$ ;  $b = -1,1519381$ ;  $c = 78,919751$ ;  $d = -642,29553$ ;  $e = 6856,5667$ ;  $f = -33634,536$ ;  $g = 84763,663$ .

Расхождения значений, вычисленных с помощью найденной функции, с тестовыми решениями не превышают 0,2%.

### Основные выводы

1. Построены граничные аппроксимирующие функции «максимальный прогиб – коэффициент формы» для упругих изотропных пластинок характерного вида, имеющих комбинированные граничные условия (комбинации шарнирного опирания и жесткого защемления).

по контуру). Эти функции необходимы для выбора «опорных решений» в специализированном программном комплексе при расчете пластинок в виде произвольного треугольника, параллелограмма, трапеции и других форм.

2. Построенные графики наглядно иллюстрируют важное изопериметрическое свойство о двусторонней ограниченности всего множества значений максимальных прогибов пластинок с комбинированными граничными условиями в виде шарнирного опирания и жесткого защемления: пластинки с жестким защемлением по контуру образуют нижнюю границу, а пластинки с шарнирным опиранием по контуру – верхнюю границу.

## 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. 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**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика»

### **Прокуров Максим Юрьевич**

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

---

A.V. KOROBKO, M.Yu. PROKUROV

## **PLOTTING OF BOUNDARY APPROXIMATING FUNCTIONS OF PLATES MAXIMUM DEFLECTION WITH INTEGRATED BOUNDARY CONDITIONS FOR APPLICATION IN INTERPOLATION METHOD BY FORM RATIO**

*Article presents the plotting of boundary curves «maximum deflection – form ratio» by means of approximation of solutions being obtained with software systems on МКЭ basis for elastically isotropic plates in the form of isosceles and right triangles, rhombs, rectangles, regular polygons and ellipses, having integrated boundary conditions of hinge support and rigid fixing. These curves are intended to select «basic solutions» in interpolation method by form ratio.*

**Keywords:** elastic plates, uniformly distributed load, maximum deflection, shape factor, approximating function.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Korobko, A.V. Geometricheskoe modelirovanie formy oblasti v dvumernyh zadachah teorii uprugosti [Tekst] / A.V. Korobko. – M.: ASV, 1999. – 320 s.
2. Chernjaev, A.A. Opredelenie maksimal'nogo progiba treugol'nyh plastinok s kombinirovannymi granichnymi uslovijami s ispol'zovaniem otnošenija 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»

### **Prokurov Maxim Yuryevich**

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

КОРОБКО В.И., САВИН С.Ю.

## СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИНОК С ОДНОРОДНЫМИ И КОМБИНИРОВАННЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ

*В статье рассматриваются задачи о свободных колебаниях упругих ортотропных пластинок в виде прямоугольников при однородных и комбинированных граничных условиях. Для этих пластинок по значениям основных частот собственных колебаний, полученным с помощью МКЭ, построены аппроксимирующие функции, аргументами которых являются коэффициент формы пластинок и соотношения цилиндрических жесткостей. Эти функции могут быть использованы непосредственно для нахождения значений основных частот колебаний прямоугольных пластинок либо для получения опорных значений при решении задач о свободных колебаниях ортотропных пластинок в виде параллелограммов и трапеций методом интерполяции по коэффициенту формы.*

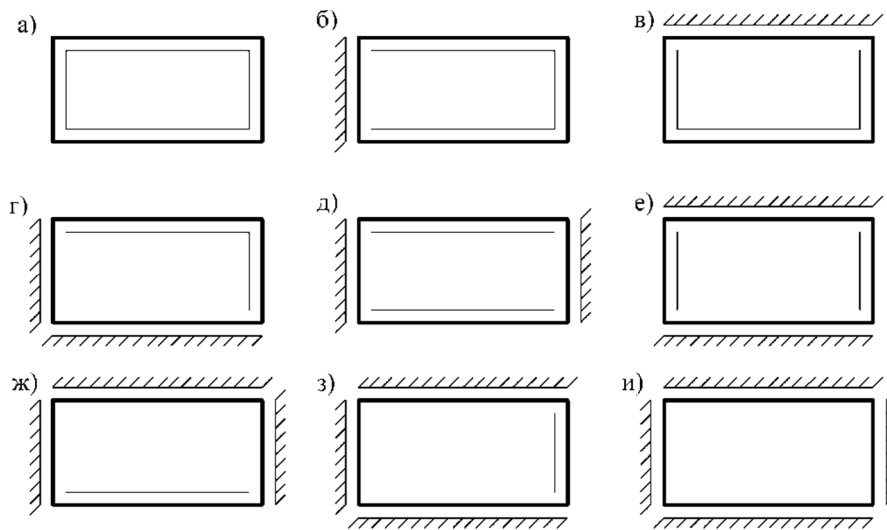
**Ключевые слова:** прямоугольные ортотропные пластинки, свободные колебания, основная частота колебаний, однородные и комбинированные граничные условия, метод интерполяции по коэффициенту формы.

При расчете строительных конструкций в виде пластинок, работающих в условиях динамических воздействий, необходимо знать хотя бы три первые собственные частоты колебаний. В тех случаях, когда рассматриваются пластинки простого очертания (прямоугольники, ромбы и т.п.) при некоторых вариантах граничных условий, могут быть получены точные решения задач о свободных колебаниях [1]. В большинстве же случаев эту задачу решают численными методами (преимущественно МКЭ). Эти методы универсальны и дают вполне удовлетворительные результаты. Однако они предоставляют весьма ограниченные возможности для анализа полученных решений и их сопоставления для пластинок различной формы. Этот недостаток может быть успешно преодолен с помощью метода интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ) [2], позволяющего установить взаимосвязь интегральных физических характеристик пластинок, таких как максимальный прогиб, основная частота собственных колебаний и критическая сила, с их очертанием.

Сущность МИКФ заключается в следующем. 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 форм других пластинок, интегральные физические характеристики которых известны (опорные решения), то искомая величина может быть найдена интерполяцией этих опорных значений по коэффициенту формы. Несмотря на свою привлекательность до настоящего времени к решению задач о свободных колебаниях упругих ортотропных пластинок МИКФ не применялся. Поэтому одно из направлений развития МИКФ связано с построением граничных кривых для пластинок определенных форм с различными комбинациями граничных условий, которые бы могли использоваться в качестве опорных решений.

В настоящей статье показан путь построения граничных кривых для основной частоты колебаний упругих ортотропных пластинок в виде прямоугольников с однородными и комбинированными граничными условиями (рис. 1). Оси ортотропии направлены вдоль сторон прямоугольных пластинок. Построение аппроксимирующих функций осуществлялось по результатам численного решения соответствующих задач с помощью МКЭ с применением программного комплекса SCAD при числе конечных элементов не менее 500 на пластинку. Выбор такой густоты разбиения пластинок на конечные элементы обусловлен следующим обстоятельством. Для пластинок с различными отношениями сторон решались тестовые задачи при разной густоте разбиения на конечные элементы (250, 500, 1000). При увеличении числа ко-

нечных элементов, приходящихся на одну пластинку, начиная с 500, значения основных частот колебаний практически совпадали.



**Рисунок 1 – Прямоугольные пластинки с однородными и комбинированными граничными условиями**

Для свободных колебаний ортотропной пластинки из теории упругости известно дифференциальное уравнение:

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - m\omega^2 w = 0, \quad (1)$$

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;  $m$  – масса пластинки, приходящаяся на единицу ее площади. Разделим правую и левую части уравнения (1) на  $H$ :

$$\frac{D_x}{H} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{D_y}{H} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \beta^4 w = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\beta^4 = \frac{m\omega^2}{H}$  – собственное значение дифференциального уравнения. Из выражения (2) видно, что при прочих одинаковых условиях (форма пластинки, граничные условия и цилиндрическая жесткость  $H$ ) решение будет зависеть от двух параметров уравнения:  $D_x/H$ ;  $D_y/H$ .

В изопериметрическом виде выражение для определения основной частоты собственных колебаний изотропных пластинок, формы областей которых могут быть объединены некоторым геометрическим преобразованием, представляется зависимостью [2]:

$$\omega = \left( K_\omega \frac{D}{m} \frac{K_f^2 + B \cdot K_f}{A^2} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $K_f = \oint_L \frac{ds}{h}$  – коэффициент формы;  $K_\omega$  – некоторая функция, зависящая от граничных условий, постоянная для пластинок с формой области одного класса (прямоугольные, трапецевидные и т.д.).

Однако для ортотропных пластин функция  $K_\omega$  будет также зависеть и от соотношения цилиндрических жесткостей  $D_x/H$  и  $D_y/H$ . Осуществим замену соотношения  $K_\omega (K_f^2 + B \cdot K_f)^{1/2}$  на функцию  $g(K_f; D_x/H; D_y/H)$ . С учетом этого выражение (3) для орто-

тропных пластин примет следующий вид:

$$\omega = g(K_f; D_x/H; D_y/H) \cdot \left( \frac{H}{A^2 m} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Неизвестную функцию  $g$  из выражения (4) 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  $n = 0, 1; 0, 2; \dots, 1, 0$  – соотношение сторон прямоугольной пластинки:

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

При этом коэффициенты  $a_n, \dots, j_n$  будут изменяться в зависимости от соотношения сторон пластинки. Учитывая это обстоятельство, 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 были получены функции следующего вида:

$$\psi_{k,l}(K_f) = \frac{A_{k,l} + C_{k,l} K_f^{1/2} + E_{k,l} K_f + G_{k,l} K_f^{3/2} + I_{k,l} K_f^2}{1 + B_{k,l} K_f^{1/2} + D_{k,l} K_f + F_{k,l} K_f^{3/2} + H_{k,l} K_f^2}. \quad (6)$$

Значения коэффициентов  $A_{k,l}, \dots, I_{k,l}$  для соответствующих  $\psi_{k,l}$  и граничных условий приведены в таблице 1.

Для конкретных значений цилиндрических жесткостей  $D_x, D_y, H$  после необходимых преобразований выражение для основной частоты свободных колебаний ортотропных пластинок примет вид, аналогичный выражению (3) для изотропных пластинок, в котором  $K_\omega$  – функция, зависящая от коэффициента формы. На рисунке 2 приведены графики зависимостей « $\omega - K_f$ » для ортотропных пластинок при соотношениях цилиндрических жесткостей  $D_x/H = 3, D_y/H = 4$  и для изотропных пластинок, жестко зашеченных по двум противоположным сторонам и свободно опертых по двум другим (рис. 1, д).

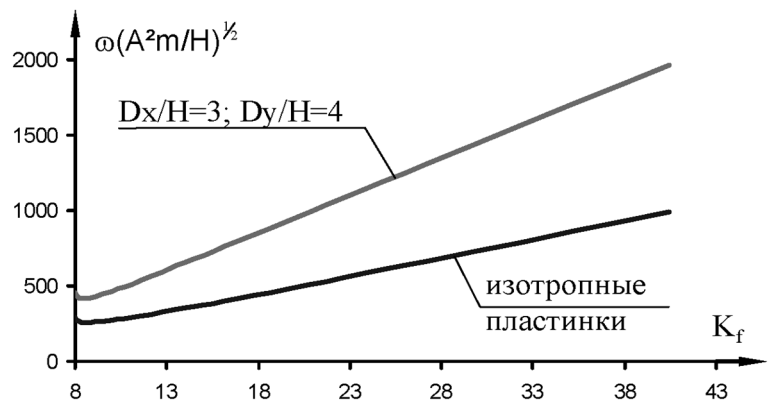


Рисунок 2

Подставляя значения переменных коэффициентов  $A_{kl}, \dots, I_{kl}$  из таблицы 1 в выражение (6) и заменяя полученными значениями коэффициенты выражения (5), найдем значения функции  $g(K_f; D_x/H; D_y/H)$ . Умножив их на размерный множитель  $(H/(A^2 m))^{1/2}$ , получим значения основных частот собственных колебаний для прямоугольных ортотропных пластинок 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 3,38%.

Таблица 1 – Значения коэффициентов  $A_{k,l}$ , ...,  $I_{k,l}$  выражения (6)

Коэффициенты выражения (5)	Коэффициенты выражения (6)								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Шарнирное опирание по контуру (рис. 1, а)									
$a$	-686,2	-1,7792	655,1	0,5703	-248,8	-0,0228	36,48	0	0
$b$	18,28	-1,139	-18,32	0,4729	6,176	-0,0828	-0,7021	0,00489	0
$c$	13,43	-1,045	31,86	0,353	-28,89	-0,0446	5,641	0,00222	0
$d$	-12,21	-0,7847	4,701	0,07889	0	0	0	0	0
$e$	55,54	-0,3356	-41,45	-0,022	7,704	0,00308	0	0	0
$f$	-25,92	-0,491	13,66	0,1041	-2,097	0	0	0	0
$g$	0,1672	-0,5195	0,05045	0,04448	-0,0387	0	0	0	0
$h$	59,31	-60,77	7,368	30,18	-43,37	0,1503	-1,123	0,00122	4,319
$i$	4,526	-1,108	-5,69	0,5829	2,731	-0,1773	-0,5988	0,02315	0,05106
$j$	1,875	-0,8095	-1,665	0,2504	0,5083	-0,0318	-0,0547	0	0
Комбинированное опирание по контуру (рис. 1, б)									
$a$	127,7	-0,9751	-113,9	0,3536	34,83	-0,0559	-3,735	0,003	0
$b$	26,45	-1,153	-26,28	0,4835	8,826	-0,0846	-1,005	0,00482	0
$c$	-314,4	-0,348	246,9	-0,0142	-48,14	0,00267	0	0	0
$d$	1,129	-1,228	-7,377	0,4029	5,3792	-0,0343	-1,19	0,00089	0,0546
$e$	136,2	0,468	-47,28	-0,0497	0	0	0	0	0
$f$	-20,15	-0,8351	17,01	0,2565	-4,917	-0,0306	0,5033	0	0
$g$	1,4711	-0,7809	-0,5312	0,07518	0	0	0	0	0
$h$	-2,575	-0,7604	2,458	0,1956	-0,7847	-0,0204	0,08388	0,00103	0
$i$	0,1047	-1,143	-0,1123	0,4785	0,04238	-0,085	-0,0056	0,00511	0
$j$	1,578	-0,9479	-1,467	0,3198	0,4634	-0,0390	-0,0503	0	0
Комбинированное опирание по контуру (рис. 1, в)									
$a$	45,49	-0,229	6,098	0,01666	1,336	0	0	0	0
$b$	66,03	-1,299	-69,9	0,6259	25,24	-0,1248	-3,106	0,00765	0
$c$	-724,1	-0,1372	570,9	-0,1089	-111,6	0,0103	0	0	0
$d$	66,97	0,9165	-52,81	-0,6017	10,33	0,05069	0	0	0
$e$	27,81	-0,4649	-27,47	0,02822	6,268	0	0	0	0
$f$	-5,704	-1,139	5,749	0,4707	-1,954	-0,0813	0,2246	0,00461	0
$g$	-6,215	0,7457	4,821	-0,5201	-0,9285	0,04371	0	0	0
$h$	-0,967	-0,4958	1,366	0,03446	-0,3622	0	0	0	0
$i$	1,082	-0,753	-0,9435	0,1965	0,2818	-0,0196	-0,0295	0	0
$j$	0,3359	-0,4814	-0,1227	0,04337	0	0	0	0	0
Комбинированное опирание по контуру (рис. 1, г)									
$a$	162,8	-0,9618	-153,1	0,3589	51,48	-0,0608	-6,272	0,00348	0
$b$	45,36	-0,7	-36,52	0,158	9,973	-0,0127	-0,9767	0	0
$c$	32,61	-1,025	20,95	0,3516	-28,53	-0,0473	6,027	0,00247	0
$d$	18,11	-0,9258	-24,08	0,2904	11,9	-0,0324	-2,5978	0,00046	0,2118
$e$	-36,79	-1,17	28,41	0,4561	-6,185	-0,0701	0,2612	0,00387	0
$f$	-42,13	-0,5359	23,35	0,117	-3,614	0	0	0	0
$g$	0,1187	-0,6741	0,01062	0,1348	-0,0192	-0,0091	0	0	0
$h$	-4,559	-0,4299	3,608	0,01688	-0,7051	-0,0003	0	0	0
$i$	0,9625	-0,7994	-0,8114	0,21	0,2266	-0,0185	-0,0212	0	0
$j$	0,4830	-0,5013	-0,2292	0,05068	0,01923	0	0	0	0
Комбинированное опирание по контуру (рис. 1, д)									
$a$	-4026	-5,648	4991	3,875	-2485	-0,7811	600,3	0,0257	-59,26
$b$	-57,12	-1,191	73,21	0,4874	-36,15	-0,0745	8,229	0,00244	-0,7333
$c$	-310,3	-0,7496	368,4	0,1284	-144,9	0,00676	18,87	-0,0009	0
$d$	2,122	-1,207	-5,176	0,5102	3,906	-0,0843	-1,199	0,00375	0,1313



Коэффициенты выражения (5)	Коэффициенты выражения (6)								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
<i>e</i>	35,45	-1,072	-50,1	0,412	27,1	-0,0622	-6,639	0,00227	0,6199
<i>f</i>	57,18	-1,257	-67,08	0,4934	29,75	-0,0495	-6,038	-0,0043	0,4878
<i>g</i>	-0,4208	-1,155	0,7401	0,4678	-0,4688	-0,074	0,1284	0,00312	-0,0129
<i>h</i>	-1,289	-1,138	2,295	0,464	-1,484	-0,0746	0,4156	0,00301	0
<i>i</i>	-3,913	-1,075	4,581	0,3663	-2,025	-0,0276	0,4071	-0,0041	-0,0321
<i>j</i>	0,07888	-1,186	-0,0396	0,4992	-0,0199	-0,0845	0,01570	0,00423	-0,0025
Комбинированное опирание по контуру (рис. 1, <i>e</i> )									
<i>a</i>	-99,04	-0,5265	118,2	0,0697	-33,54	-0,0033	1,423	0	0
<i>b</i>	1,272	-0,5726	4,173	0,091	-1,658	-0,005	0	0	0
<i>c</i>	-376,3	-0,8052	467,1	0,1903	-190	-0,0115	25,41	0,00024	0
<i>d</i>	7,933	-0,4745	-7,57	0,0437	1,696	-0,0012	0	0	0
<i>e</i>	59,45	-0,7973	-71,61	0,1847	28,41	-0,0104	-3,719	0,00022	0
<i>f</i>	-5,84	-1,089	5,678	0,4306	-1,847	-0,0719	0,2014	0,00408	0
<i>g</i>	-0,7971	-0,4799	0,7428	0,0465	-0,1637	-0,0014	0	0	0
<i>h</i>	-12,53	-0,0837	9,579	-0,1314	-1,821	0,01143	0	0	0
<i>i</i>	-0,3653	-0,4773	0,3357	0,032	-0,0803	0	0	0	0
<i>j</i>	0,8052	-1,283	-0,6731	0,4552	0,1300	-0,0481	0,00336	0,00157	0
Комбинированное опирание по контуру (рис. 1, <i>ж</i> )									
<i>a</i>	-784,7	-1,969	1106	1,095	-627,6	-0,2077	168,5	0,00798	-17,75
<i>b</i>	-26,56	-0,882	28,07	0,25	-10,47	-0,0255	1,366	0,00112	0
<i>c</i>	-213,2	-0,8563	291,3	0,2156	-127,3	-0,0143	18,02	0,00034	0
<i>d</i>	7,405	-1,143	-12,32	0,4582	7,521	-0,072	-2,01	0,00305	0,199
<i>e</i>	-88,63	-1,371	66,25	0,5484	-13,43	-0,0776	0,3845	0,00389	0
<i>f</i>	14,89	-1,2	-19,07	0,4966	9,402	-0,0768	-2,147	0,00247	0,1939
<i>g</i>	-0,8721	-1,157	1,3957	0,4698	-0,834	-0,0745	0,2207	0,00311	-0,0218
<i>h</i>	-3,114	-1,149	4,812	0,4667	-2,813	-0,0737	0,7353	0,00286	-0,0723
<i>i</i>	-1,719	-1,167	2,155	0,4647	-1,034	-0,0667	0,2276	0,00143	-0,0196
<i>j</i>	0,06045	-0,5920	-0,0018	0,09525	-0,0115	-0,0054	0	0	0
Комбинированное опирание по контуру (рис. 1, <i>з</i> )									
<i>a</i>	-140,4	-1,099	244,2	0,429	-152,4	-0,067	41,2	0,00299	-4,118
<i>b</i>	13,93	-0,6499	-6,622	0,1277	0,8034	-0,0084	-0,0879	0	0
<i>c</i>	-264,6	-0,8567	355,1	0,2263	-153,1	-0,019	21,46	0,00068	0
<i>d</i>	20,18	-0,0374	-8,88	0	0	0	0	0	0
<i>e</i>	23,47	-0,8934	-44,02	0,2247	22,76	-0,0119	-3,581	0	0
<i>f</i>	12,15	-0,8565	-12,73	0,2162	4,683	-0,0153	-0,6014	0,00061	0
<i>g</i>	0,3542	-0,6782	-0,1234	0,1375	-0,0016	-0,0092	0	0	0
<i>h</i>	-1,475	-0,4843	2,011	0,0327	-0,5297	0	0	0	0
<i>i</i>	0,6956	-0,5709	-0,3516	0,1015	0,045	-0,0051	0	0	0
<i>j</i>	0,4691	-1,215	-0,5025	0,5337	0,1801	-0,0983	-0,0216	0,00610	0
Комбинированное опирание по контуру (рис. 1, <i>и</i> )									
<i>a</i>	21,3	-0,7251	-45,11	0,1091	55,44	0,00885	-27,85	-0,0003	4,578
<i>b</i>	-75,22	-1,216	110,2	0,5082	-61,65	-0,0796	15,62	0,00274	-1,508
<i>c</i>	-271,4	-0,8512	369,9	0,2189	-161,3	-0,0166	22,78	0,0005	0
<i>d</i>	17,96	-1,042	-26,1	0,3769	14,16	-0,0516	-3,404	0,00158	0,3065
<i>e</i>	23,38	-0,9015	-38,26	0,252	18,44	-0,0231	-2,769	0,0009	0
<i>f</i>	-2,89	-1,273	1,093	0,5824	0,8675	-0,1087	-0,5517	0,00627	0,0835
<i>g</i>	-0,025	-0,9998	0,2765	0,3345	-0,1967	-0,0437	0,03615	0,00231	0
<i>h</i>	0,3834	-0,9818	0,7727	0,3076	-0,6965	-0,0347	0,1327	0,00157	0
<i>i</i>	-3,797	-1,118	4,976	0,3849	-2,493	-0,0289	0,5683	-0,0041	-0,0499
<i>j</i>	-3,026	0,7779	3,848	-1,157	-1,654	0,3421	0,2537	-0,0262	-0,0058

### Выводы

1. Построены аппроксимирующие функции для нахождения значений основной частоты собственных колебаний упругих ортотропных пластинок в виде прямоугольников при однородных и комбинированных граничных условиях.
2. Полученные аппроксимирующие функции могут быть использованы для непосредственного расчета прямоугольных пластинок и в качестве граничной кривой для выбора опорных решений, а также для разработки программного комплекса, реализующего метод интерполяции по коэффициенту формы при расчете ортотропных пластинок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробко, В.И. Строительная механика пластинок: техническая теория: Учебное пособие [Текст] / под редакцией В.И. Коробко. – М.: Издательский дом «Спектр», 2010. – 410 с.
2. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формы области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: АСВ, 1999. – 320 с.

#### Коробко Виктор Иванович

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
E-mail: vikor10@mail.ru

#### Савин Сергей Юрьевич

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

### FREE VIBRATION OF THE RECTANGULAR ORTHOTROPIC PLATE WITH HOMOGENEOUS AND COMBINED BOUNDARY CONDITIONS

*The article describes the problem of free vibrations of elastic orthotropic plates in the form of rectangles with combined and with homogeneous boundary conditions. For these plates the values of the fundamental frequency of vibrations were 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 fundamental frequency of rectangular plates, or to obtain reference values for solving the problem of free vibrations of orthotropic plates in the form of parallelograms and trapezoids using the interpolation technique by shape factor.*

**Keywords:** *the rectangular orthotropic plates, free vibrations, the fundamental frequency of vibration, homogeneous and combined boundary conditions, the interpolation technique by shape factor.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Korobko, V.I. Stroitel'naja mehanika plastinok: tehničeskaja teorija: Učebnoe posobie [Tekst] / pod redakcij V.I. Korobko. – M.: Izdatel'skij dom «Spektr», 2010. – 410 s.
2. Korobko, A.V. Geometričeskoe modelirovanie formy oblasti v dvumernyh zadachah teorii uprugosti [Tekst] / A.V. Korobko. – M.: ASV, 1999. – 320 s.

#### Korobko Viktor Ivanovich

State university – educational-science-production complex, Orel  
Doctor of technical science, professor of department «Construction structures and materials»  
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

МАЙ ДЫК МИНЬ

## РАСЧЕТ ТОННЕЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ГРУНТАХ, ПЕРЕСЕКАЮЩИХ ЗОНЫ РАЗЛОМА, НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

*В работе приведен метод расчета тоннелей, расположенных в упругопластических грунтах, пересекающих зоны разлома. Тоннель рассматривается в качестве балки на упругом основании при заданном перемещении основания. Метод решения основывается на свойствах изображений Фурье финитных функций. Приведены и проанализированы результаты напряженно-деформированного состояния тоннельной обделки, пересекающей зону разлома при заданной подвижке границ разлома.*

**Ключевые слова:** тоннель, зона тектонического разлома, балка в упругопластической среде, изображение Фурье финитных функций.

Подземные сооружения в меньшей мере подвержены разрушениям при воздействии землетрясений по сравнению с наземными конструкциями. Тем не менее, следует отметить, что известны случаи, когда разрушались и подземные сооружения. Это тоннели, расположенные в поверхностных мягких слоях грунтов, расположенных на скальных коренных породах. Такие разрушения также происходят вследствие разжижения грунтов. При землетрясениях очень часто происходят подвижки слоев грунтов, обладающих различными свойствами. Тоннели, пересекающие такие границы, могут быть повреждены, если смещения слоев достаточно велики. Тоннели, расположенные в мягких грунтах, можно рассматривать как балки в упругой среде (или считать балками на упругом основании). Как правило, разломы обычно являются границами слоев грунтов с различными инженерно-геологическими характеристиками.

Для оценки реакции тоннеля, пересекающего разлом, на сейсмическое воздействие, представляющее перемещение границ разлома, рассматривается модель тоннеля в виде балки на упругопластическом основании с различными характеристиками. Исходными данными являются параметры поперечного сечения обделки, характеристики грунта и величина относительного смещения слоев грунта.

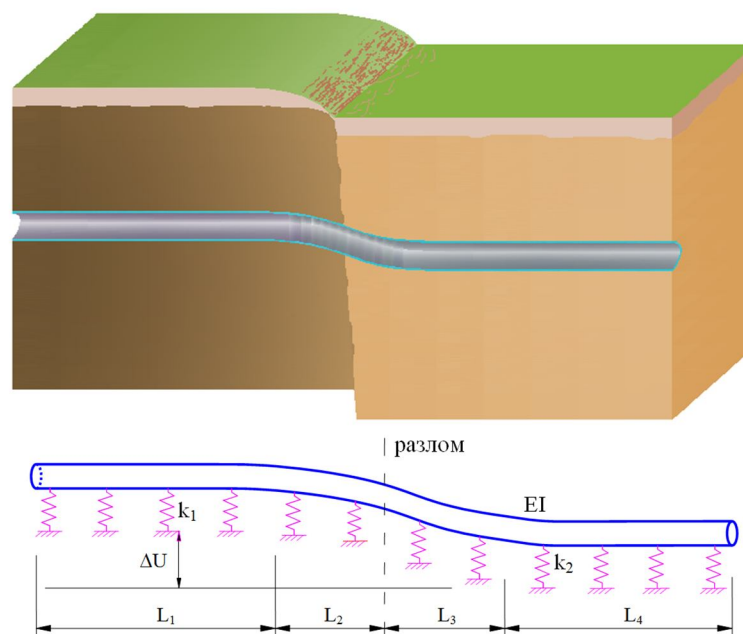


Рисунок 1 – Расчетная схема тоннеля, расположенного на упругопластическом основании

Грунт на ближних к разлому участках может работать в пластической или в упругой стадии, а на дальних – в упругой. Предполагаем, что ближние участки грунта, имеющие протяженность  $L_2$  и  $L_3$  вдоль оси работают, в упругопластической стадии, участки  $L_1$  и  $L_4$  – в упругой. Разделим конструкцию на 4 элемента с длинами  $L_i$  ( $i=1 \div 4$ ).

Используем локальную систему координат для каждого элемента, представленную на рисунке 2:

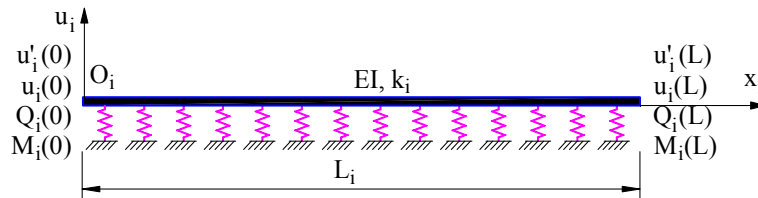


Рисунок 2 – Локальная система координат элемента

В качестве модели тоннеля воспользуемся балкой Эйлера-Бернулли. Дифференциальные уравнения балки Эйлера-Бернулли на упругом основании в обобщенных финитных функциях [1] имеет вид:

для I-го участка:

$$EI \frac{d^4 U_1}{dx^4} + k_1 U_1 = EI u_1'(0) \delta''(x) + EI u_1(0) \delta'''(x) - Q_1(L_1) \delta(x - L_1) - M_1(L_1) \delta'(x - L_1) - EI u_1'(L_1) \delta''(x - L_1) - EI u_1(L_1) \delta'''(x - L_1) \quad ; \quad (1)$$

для IV-го участка:

$$EI \frac{d^4 U_4}{dx^4} + k_2 U_4 = Q_4(0) \delta(x) + M_4(0) \delta'(x) + EI u_4'(0) \delta''(x) + EI u_4(0) \delta'''(x) - EI u_4'(L_4) \delta''(x - L_4) - EI u_4(L_4) \delta'''(x - L_4) \quad . \quad (2)$$

Дифференциальные уравнения балки на пластичном основании представятся в следующем виде:

$$EI \frac{d^4 U_2}{dx^4} = -P_2 \quad (= -P_2^{ж,пла}) \quad ; \quad (3)$$

$$EI \frac{d^4 U_3}{dx^4} = -P_3 \quad (= -P_3^{ж,пла}) \quad , \quad (4)$$

где  $U_i(x) = u_i(x)[H(x) - H(x - L_i)]$ ;  $H(x)$  – функция Хевисайда (функция единичного скачка);  $L_i$  – координата конца части  $i$ -той балки;  $\delta(x)$  – функция Дирака.

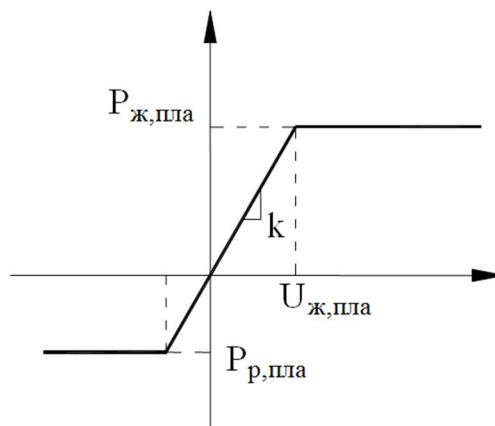


Рисунок 3 – Идеальная диаграмма связи давления и перемещения упругопластического грунта

Дифференцируя уравнения (3) и (4), получим связи неизветных на концах элемента:

$$\begin{cases} Q_2(0) - Q_2(L_2) = -P_2 L_2 \\ Q_2(0)L_2 + M_2(0) - M_2(L_2) = -\frac{P_2 L_2^2}{2} \\ u_2'(0) - u_2'(L_2) - \frac{Q_2(0)L_2^2}{2EI} - \frac{M_2(0)L_2}{EI} = \frac{P_2 L_2^3}{6EI} \\ u_2(0) - u_2(L_2) + u_2'(0)L_2 - \frac{Q_2(0)L_2^3}{6EI} - \frac{M_2(0)L_2^2}{2EI} = \frac{P_2 L_2^4}{24EI} \end{cases} ; \quad (5)$$

$$\begin{cases} Q_3(0) - Q_3(L_3) = -P_3 L_3 \\ Q_3(0)L_3 + M_3(0) - M_3(L_3) = -\frac{P_3 L_3^2}{2} \\ u_3'(0) - u_3'(L_3) - \frac{Q_3(0)L_3^2}{2EI} - \frac{M_3(0)L_3}{EI} = \frac{P_3 L_3^3}{6EI} \\ u_3(0) - u_3(L_3) + u_3'(0)L_3 - \frac{Q_3(0)L_3^3}{6EI} - \frac{M_3(0)L_3^2}{2EI} = \frac{P_3 L_3^4}{24EI} \end{cases} . \quad (6)$$

Используя условие неразрывной балки, имеем:

$$u_1(L_1) = u_2(0); \quad u_2(L_2) = u_3(0) - \Delta U; \quad u_3(L_3) = u_4(0); \quad (7)$$

$$Q_i(L_i) = Q_{i+1}(0); \quad M_i(L_i) = M_{i+1}(0); \quad u_i'(L_i) = u_{i+1}'(0); \quad (i = 1, 2, 3)$$

Запишем системы уравнения (5) и (6) в виде матрицы:

$$[K_2]\{u_2\} = \{P_2\}; \quad (8)$$

$$[K_3]\{u_3\} = \{P_3\}; \quad (9)$$

где  $[K_j]$  – матрицы жесткости элементов;  $[u_j]$  – матрицы условий границ элементов;  $[P_j]$  – матрицы нагрузки элементов.

Применив преобразование Фурье к обеим частям уравнений (1) и (2), получим:

$$\begin{aligned} [v^4 + 4\beta_1^4]\tilde{U}_1(v) &= u_1'(0)(-iv)^2 + u_1(0)(-iv)^3 - \frac{Q_1(L_1)}{EI}e^{ivL_1} - \frac{M_1(L_1)}{EI}e^{ivL_1}(-iv); \\ &\quad - u_1'(L_1)e^{ivL_1}(-iv)^2 - u_1(L_1)e^{ivL_1}(-iv)^3 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} [v^4 + 4\beta_2^4]\tilde{U}_4(v) &= \frac{Q_4(0)}{EI} + \frac{M_4(0)}{EI}(-iv) + u_4'(0)(-iv)^2 + u_4(0)(-iv)^3 \\ &\quad - u_4'(L_4)e^{ivL_4}(-iv)^2 - u_4(L_4)e^{ivL_4}(-iv)^3 \end{aligned}, \quad (11)$$

$$\text{где } 4\beta_1^4 = \frac{k_1}{EI}, \quad 4\beta_2^4 = \frac{k_2}{EI}.$$

В правой части уравнений (8) и (9) содержится вся информация о воздействии на балку: перемещения, углы, поперечные силы и моменты на концах элемента. Обозначим правую часть уравнений через  $Q_i^{oo}(x)$ , которые назовем обобщенными нагрузками. Представим (8) и (9) в следующем виде:

$$\begin{cases} \tilde{U}_1(v) = \frac{Q_1^{oo}(x)}{v^4 + 4\beta_1^4} \\ \tilde{U}_4(v) = \frac{Q_4^{oo}(x)}{v^4 + 4\beta_2^4} \end{cases}. \quad (12)$$

В соответствии с теоремой Винера-Пэли-Шварца, числитель выражений (12) должен делиться без остатка на знаменатель. Из этого следует, что он должен быть равен нулю при значениях, равных корням знаменателя. Используя это условие, получим:

$$\begin{cases} Q_1^{oo}(v_{1j}) = 0 \\ Q_4^{oo}(v_{2j}) = 0 \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, 4, \quad (13)$$

где  $v_{kj}$  – корни уравнения  $v^4 + 4\beta_k^4 = 0$ .

Решив уравнение, получим:

$$\begin{aligned} v_{k1} &= \sqrt{2}\beta_k e^{i\frac{\pi}{4}} = \beta_k(1+i); & v_{k2} &= -\sqrt{2}\beta_k e^{-i\frac{\pi}{4}} = -\beta_k(1-i); \\ v_{k3} &= -\sqrt{2}\beta_k e^{i\frac{\pi}{4}} = -\beta_k(1+i); & v_{k4} &= \sqrt{2}\beta_k e^{-i\frac{\pi}{4}} = \beta_k(1-i). \end{aligned}$$

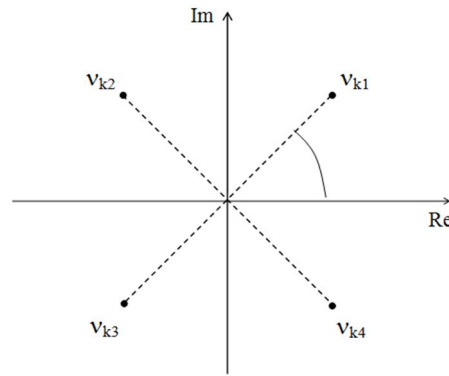


Рисунок 4 – Схема корни выражения  $v^4 + 4\beta_k^4 = 0$

Подставим корни  $v_{kj}$  ( $k=1,2; j = 1\div 4$ ) в систему уравнения (13), получим две системы уравнений, соответствующие двум участкам тоннеля:

$$[K_1]\{u_1\} = \{P_1\}; \quad (14)$$

$$[K_4]\{u_4\} = \{P_4\}, \quad (15)$$

где матрицы жесткости элементов  $[K_1]$  и  $[K_4]$  представлены в виде:

$$[K_1] = \begin{bmatrix} -v_{11}^2 & iv_{11}^3 & -\frac{e^{iv_{11}L_1}}{EI} & \frac{iv_{11}e^{iv_{11}L_1}}{EI} & v_{11}^2e^{iv_{11}L_1} & -iv_{11}^3e^{iv_{11}L_1} \\ -v_{12}^2 & iv_{12}^3 & -\frac{e^{iv_{12}L_1}}{EI} & \frac{iv_{12}e^{iv_{12}L_1}}{EI} & v_{12}^2e^{iv_{12}L_1} & -iv_{12}^3e^{iv_{12}L_1} \\ -v_{13}^2 & iv_{13}^3 & -\frac{e^{iv_{13}L_1}}{EI} & \frac{iv_{13}e^{iv_{13}L_1}}{EI} & v_{13}^2e^{iv_{13}L_1} & -iv_{13}^3e^{iv_{13}L_1} \\ -v_{14}^2 & iv_{14}^3 & -\frac{e^{iv_{14}L_1}}{EI} & \frac{iv_{14}e^{iv_{14}L_1}}{EI} & v_{14}^2e^{iv_{14}L_1} & -iv_{14}^3e^{iv_{14}L_1} \end{bmatrix}; \quad (16)$$

$$[K_4] = \begin{bmatrix} \frac{1}{EI} & -\frac{iv_{21}}{EI} & -v_{21}^2 & iv_{21}^3 & v_{21}^2e^{iv_{21}L_4} & -iv_{21}^3e^{iv_{21}L_4} \\ \frac{1}{EI} & -\frac{iv_{22}}{EI} & -v_{22}^2 & iv_{22}^3 & v_{22}^2e^{iv_{22}L_4} & -iv_{22}^3e^{iv_{22}L_4} \\ \frac{1}{EI} & -\frac{iv_{23}}{EI} & -v_{23}^2 & iv_{23}^3 & v_{23}^2e^{iv_{23}L_4} & -iv_{23}^3e^{iv_{23}L_4} \\ \frac{1}{EI} & -\frac{iv_{24}}{EI} & -v_{24}^2 & iv_{24}^3 & v_{24}^2e^{iv_{24}L_4} & -iv_{24}^3e^{iv_{24}L_4} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Учитывая равенства перемещений, углов поворота, моментов и поперечных сил на концах участков тоннеля и соотношения (8), (9), (14) и (15), мы получим общую систему уравнений, состоящую из 16 уравнений и 16 неизвестных, в виде:

$$[K][U] = [P], \quad (18)$$

где  $[K]$  – общая матрица жесткости элементов.

$$[K] = \begin{bmatrix} [K_1] & 0 \\ & [K_2] \\ & [K_3] \\ 0 & [K_4] \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$[U]$  – общая матрица условий границ элементов;  $[P]$  – общая матрица нагрузки.

При решении системы уравнения (18) используется метод последовательных приближений. Первым приближением является решение в упругой стадии. На следующем этапе рассматривается решение, учитывающее пластическое поведение на малой части балки вблизи границы. Полученное решение позволяет определить расстояние, на котором реакция отпор

является упругопластической. Решение повторяется до тех пор, пока наибольшие напряжения в грунте достигнут предельных упругих значений.

Алгоритм решения представлен ниже.

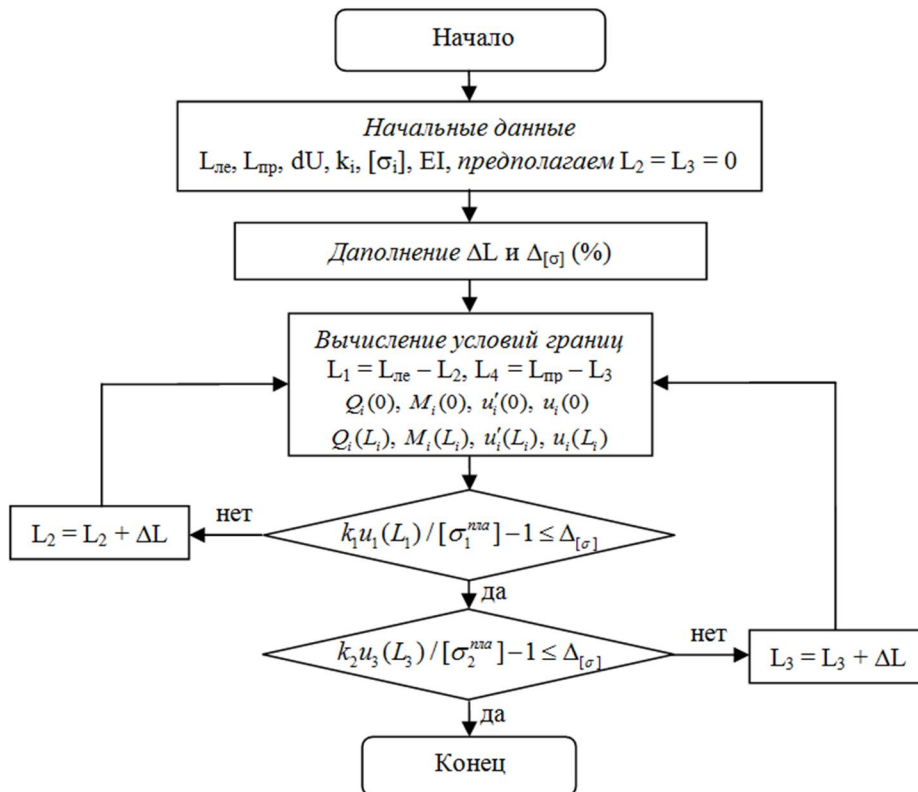


Рисунок 5 – Блок схемы программы

Для второго и третьего элементов функции прогиба имеют вид:

$$u_i(x) = u_i(0) + u_i'(0)x - \frac{M_i(0)}{2EI}x^2 - \frac{Q_i(0)}{6EI}x^3 - \frac{P_i}{24EI}x^4 \quad (i=2,3). \quad (20)$$

Для определения функции прогиба первого и четвертого элементов необходимо выполнить обратное преобразование Фурье:

$$u_1(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Q_1^{об}(x)}{v^4 + 4\beta_1^4} e^{-ivx} dv; \quad (21)$$

$$u_4(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Q_4^{об}(x)}{v^4 + 4\beta_2^4} e^{-ivx} dv. \quad (22)$$

Для вычисления интегралов используется теория вычетов.

Используя аналитические выражения для прогибов, определим моменты и поперечные силы в сечениях тоннельной обделки.

**Пример.** Обделка перегонного тоннеля из монолитно-прессованного бетона пересекает зону разлома. Исходные расчетные данные:

- коэффициент постели  $K_1 = 3 \cdot 10^5$  кН/м<sup>3</sup>,  $K_2 = 2 \cdot 10^5$  кН/м<sup>3</sup> [2].

- пределы упругости на сжатие грунтов:

слева от разлома  $[\sigma_1^{пла}] = 3300$  кН/м<sup>2</sup>;

справа от разлома  $[\sigma_2^{пла}] = 2200$  кН/м<sup>2</sup>.

- материал обделки – бетон с модулем упругости  $E_6 = 2,4 \cdot 10^7$  кН/м<sup>2</sup> [2].

Длина тоннеля:  $L_1 + L_2 = L_3 + L_4 = 50$  м.

Относительное смещение тоннеля в зоне разлома:  $\Delta u = -0,1$  м.

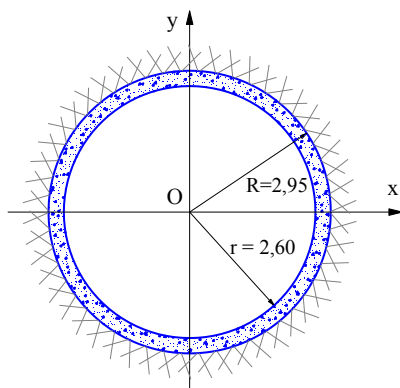


Рисунок 6 – Схема обделки тоннелей кругового очертания

Результаты расчета:

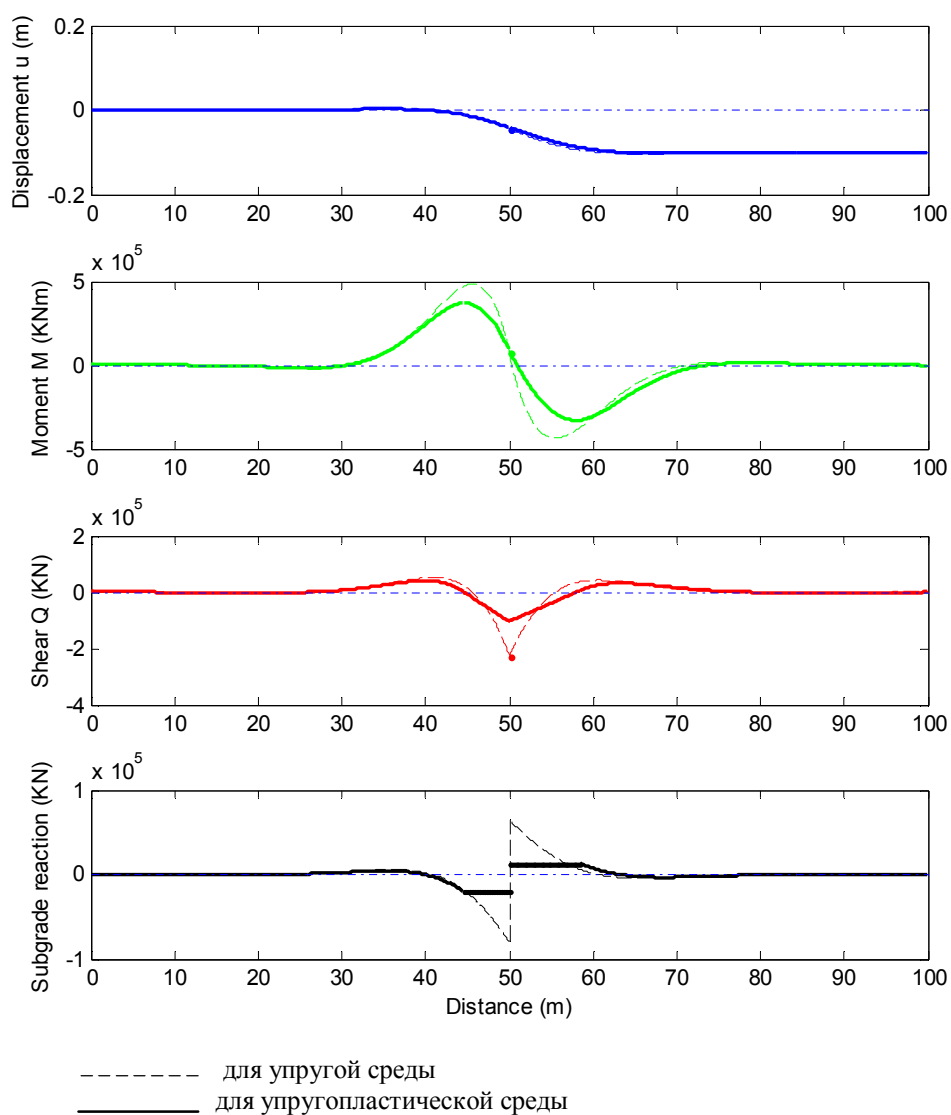


Рисунок 7 – График перемещений, внутренних усилий в тоннельной обделке и реакции грунта

Внутренние усилия в тоннельной обделке без учета пластического поведения грунта:

- максимальный момент:  $M_{\max}^{ynp} = 4,83 \cdot 10^5 \text{ KNm}$  ;
- максимальная поперечная сила:  $Q_{\max}^{ynp} = 2,26 \cdot 10^5 \text{ KN}$  .



Внутренние усилия в тоннельной обделке с учетом пластического поведения грунта:

- длина пластическая зоны:  $L_2 = 5,42$  м;  $L_3 = 8,41$  м;
- максимальный момент:  $M_{\max} = 3,71 \cdot 10^5$  кНм;
- максимальная поперечная сила:  $Q_{\max} = 1,04 \cdot 10^5$  кН.

### Вывод

Решена задача по определению напряженно деформированного состояния тоннельной обделки, пересекающей зону разлома. В качестве модели использована балка на упругом и на упруго пластическом основании. При учете пластического поведения грунта внутренние усилия в тоннельной обделке при сдвиге в зоне разломе уменьшаются.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбацкий, Е.Н. Метод решения задач строительной механики и теории упругости, основанный на свойствах изображений Фурье финитных функций [Текст]: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МИИТ. – 1995. – 205 с.
2. Шаншиев, С.К. Проектирование обделок гидротехнических туннелей из монолитного бетона и железобетона [Текст] / С.К. Шаншиев. – Госэнергоиздат, 1960.
3. Александров, А.В. Сопротивление материалов [Текст] / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин. – М.: Высшая школа, 2000.
4. Клепиков, С.Н. Расчет конструкций на упругом основании [Текст] / С.Н. Клепиков. – Киев: Изд-во будівельник, 1967.

### Май Дык Минь

Московский государственный университет путей сообщения, г. Москва  
Аспирант кафедры «Подземные сооружения»  
Тел.: +7 (499) 978-40-75  
E-mail: usd.miit@gmail.com

---

MAI DUC MINH

## SEISMIC ANALYSIS OF TUNNELS CROSSING THE FAULT ZONE IN ELASTO-PLASTIC SOILS

*The paper presents the method of tunnel lining calculation in elasto-plastic soil subjected to fault displacement. The tunnel lining is considered as a beam on the elastic foundation. The proposed method is based on the properties of the finite functions Fourier transforms. The author present the analysis results of the stress-strain state of the tunnel lining crossing through the fault zone.*

**Keywords:** tunnel, fault zone, beam in an elastic-plastic medium, finite function, the Fourier transform of finite functions.

## BIBLIOGRAPHY

1. Kurbackij, E.N. Metod reshenija zadach stroitel'noj mehaniki i teorii uprugosti, osnovannyj na svojstvah izobrazhenij Fur'e finitnyh funkcij [Tekst]: Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniceskikh nauk. – М.: МИИТ, 1995. – 205 с.
2. Shanshiev, S.K. Proektirovanie obdelok gidrotehniceskikh tunnelej iz monolitnogo betona i zhelezobetona [Tekst] / S.K. Shanshiev. – Gosjenergoizdat, 1960.
3. Aleksandrov, A.V. Soprotivlenie materialov [Tekst] / A.V. Aleksandrov, V.D. Potapov, B.P. Derzhavin. – М.: Vysshaja shkola, 2000.
4. Klepikov, S.N. Raschet konstrukcij na uprugom osnovanii [Tekst] / S.N. Klepikov. – Kiev: Izd-vo budivel'nik, 1967.

### Mai Duc Minh

Moscow state university of railway engineering, Moscow  
Post-graduate student of department «Underground constructions»  
Тел.: +7 (499) 978-40-75  
E-mail: usd.miit@gmail.com

ОСОВСКИХ Е.В., КОЛЧУНОВ В.И., АФОНИН П.А.

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ, ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СКЛАДЧАТЫХ ПОКРЫТИЙ В ПРЕДЕЛЬНЫХ И ЗАПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ

*В работе на основе анализа результатов экспериментальных исследований на моделях и натурных конструкциях даны предложения к проектному и запроектному расчету железобетонных призматических складок. В качестве расчетного аппарата для анализа деформирования и разрушения исследуемых конструктивных систем с учетом физической и конструктивной нелинейности предложено использовать комбинацию вариационного метода В.З. Власова в сочетании с методом последовательных нагружений.*

**Ключевые слова:** железобетонные складчатые покрытия, деформирование, предельные состояния, разрушение, конструктивная безопасность.

Исследованиями, проводимыми в последние годы в РААСН, МИИТ, ГУ-УНПК и других научных организациях, сформулировано новое научное направление, связанное с конструктивной безопасностью и живучестью зданий и сооружений. По этой тематике применительно, в основном, к стержневым конструктивным системам сформулирован и решен ряд задач постановочного характера, сделаны отдельные предложения по оценке остаточного ресурса конструктивных систем в предельных состояниях.

В настоящей статье в рамках обозначенной проблемы на основе анализа результатов экспериментальных исследований на моделях и натурных конструкциях даны предложения к проектному и запроектному расчету железобетонных складчатых систем применительно к пространственным покрытиям одноэтажных производственных зданий.

Для качественного анализа деформирования и разрушения исследуемых конструктивных систем в предельных состояниях предпочтительно иметь аналитический или полуаналитический расчетный аппарат. В этой связи в рассматриваемой работе предложено использовать вариационный метод, в частности, комбинацию вариационного метода В.З. Власова [1] в сочетании с методом последовательных нагружений для раскрытия физической и конструктивной нелинейности.

При разработке расчетного аппарата принята во внимание необходимость учета не только нелинейности деформирования и наличия трещин, но и влияния средовых воздействий, связанных с длительной эксплуатацией и (или) неблагоприятными условиями.

Основная система при использовании смешанного метода выбрана в виде складчатой системы с внешними непрерывными продольными связями, расположенными вдоль всех промежуточных ребер и наружных продольных краев и цилиндрическими шарнирами, допускающими взаимное смещение смежных граней в промежуточных ребрах (рис. 1). Напряженное состояние в складке характеризуется нормальными и сдвигающими осевыми силами  $N$ ,  $NI$ ,  $S$  и поперечными изгибающими моментами  $M$ .

Как и при расчете упругих систем, сохранена гипотеза о нерастяжимости поперечного контура складки  $\varepsilon_I = 0$ . Гипотеза об отсутствии деформаций сдвига не вводится  $\gamma \neq 0$ . Внешняя равномерно распределенная нагрузка приведена к полосовой нагрузке вдоль ребер и учитывается своими составляющими в плоскостях соответствующих граней.

Принимается также, что во всем диапазоне деформирования складчатой системы первоначальные очертания граней сохраняются, а образование трещин моделируется некоторой приведенной толщиной с использованием коэффициентов приведения типа  $\psi_R$  [2]. В качестве дополнительных гипотез, учитывающих специфику деформирования железобетона, используются деформационные зависимости теории деформирования железобетона с трещинами

Н.И. Карпенко [3], с введением обобщенных усилий для характерных расчетных элементов, расположенных в соответствующих зонах железобетонной складки (рис. 1, элементы Э1..Э4). Расположение зон и характер их напряженно-деформированного состояния определены расчетом и подтверждены экспериментально по результатам испытаний крупномасштабной модели железобетонного складчатого покрытия (рис. 2).

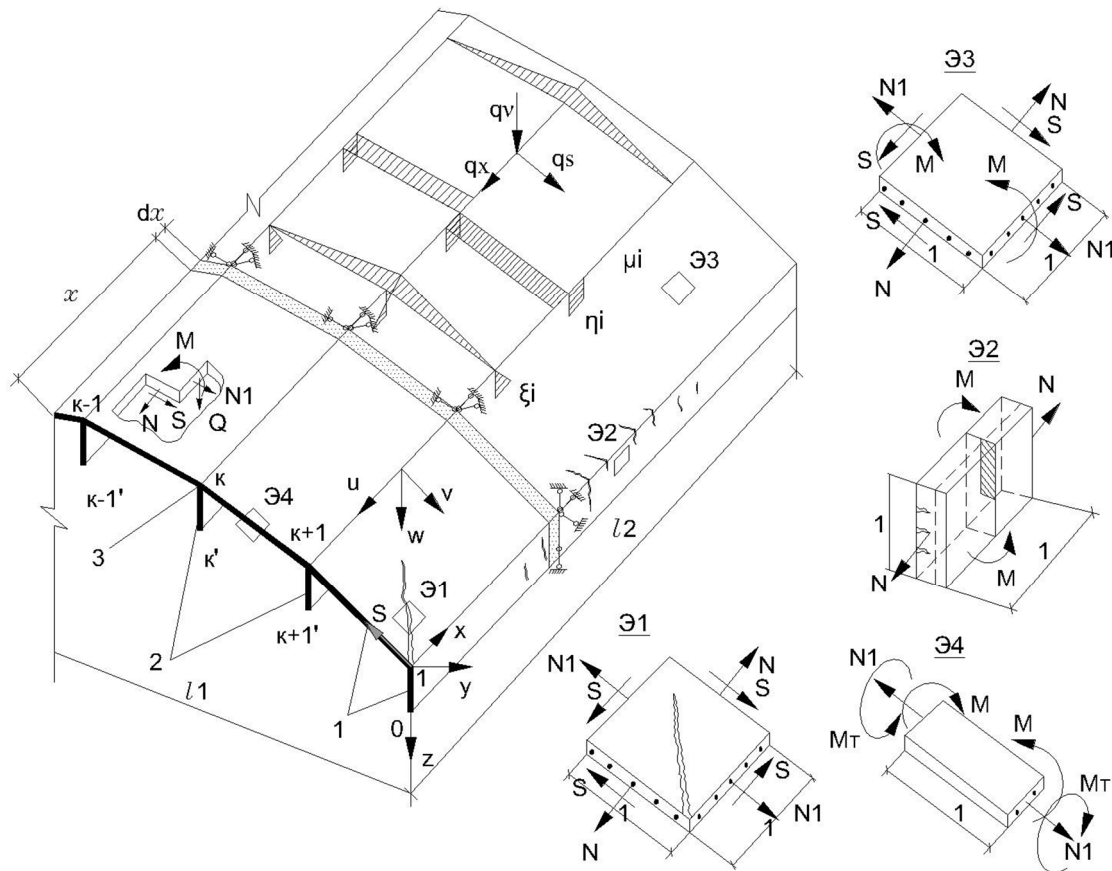


Рисунок 1 – Расчетная схема железобетонной складки:  
1 – основные грани; 2 – дополнительные грани; 3 – цилиндрические шарниры

Нелинейная задача деформирования железобетонной складчатой системы с трещинами решается методом итераций.

Уравнения равновесия бесконечно малого элемента в матричной форме с учетом гипотез вариационного метода на каждой итерации представлены в виде:

	$NI$	$N$	$S$	$M$	$Q$	$q$
$U$	$\partial/\partial x$		$\partial/\partial s$			$q_x$
$V$		$\partial/\partial s$	$\partial/\partial x$		$-K$	$q_s$
$W$				$\partial/\partial s$		$q_v$
	$\varepsilon_l$	$\varepsilon$	$\tau$	$\chi$		

(1)

где  $K$  – кривизна по координате  $s$ ;  $q_x = q_x(x, s)$ ,  $q_s = q_s(x, s)$ ,  $q_v = q_v(x, s)$  – компоненты вектора интенсивности внешней нагрузки.

Приведение двумерной задачи расчета рассматриваемых тонкостенных систем к одномерной на каждой итерации выполнено представлением компонент вектора перемещений  $U=U(x, s)$ ,  $V=V(x, s)$ ,  $W=W(x, s)$  и моментов  $M=M(x, s)$  в форме разложений в следующие односторонние ряды:

$$\begin{aligned}
 U(x,s) &= \sum_i U_i(x)\xi_i(s) + \sum_c U_c(x)\xi_c(s); \\
 V(x,s) &= \sum_i V_i(x)\eta_i(s) + \sum_g V_g(x)\eta_g(s); \\
 W(x,s) &= \sum_i W_i(x)f_i(s) + \sum_g W_g(x)f_g(s) + \sum_p W_p(x)f_p(s); \\
 M(x,s) &= \sum_m M_m(x)\mu_m(s).
 \end{aligned} \tag{2}$$

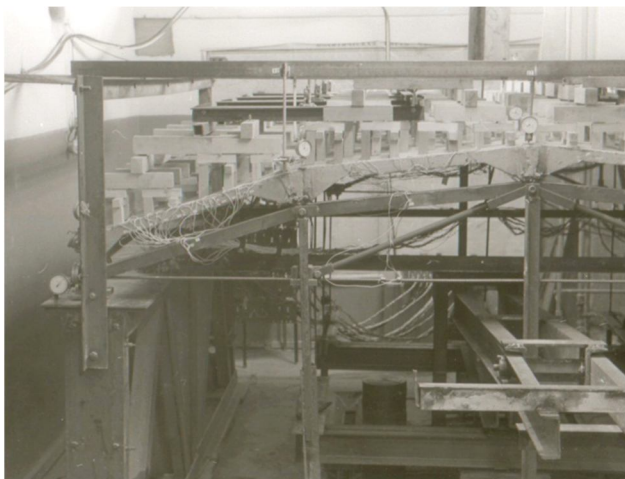


Рисунок 2 – Общий вид испытаний крупномасштабной модели складчатого покрытия (а);  
схема образования трещин (б)

В разложении (2)  $U=U(x)$ ,  $V=V(x)$ ,  $W=W(x)$ ,  $M=M(x)$  на заданном уровне нагрузки зависят только от координаты  $x$ , это функции обобщенных перемещений и моментов, подлежащих определению.

Единичные функции  $\xi(s) \dots \mu(s)$  зависят только от поперечной координаты  $s$ , выбирают предварительно, их изменение по ширине отдельной грани и для эквивалентного приведенного сечения железобетонной складки принимается линейным. При этом  $\mu(s)$  выбирается в соответствии со статическими граничными условиями на продольных краях складки, прочие – с кинематическими.

Интегральные условия равновесия элементарной поперечной полосы, выделенной двумя поперечными сечениями с координатами  $x$  и  $x+dx$  и длиной, равной длине контура поперечного сечения  $b$ , составляются по известной схеме на основе принципа возможных перемещений. В результате формализации структура исходных уравнений вариационного метода в смешанной форме приводится к виду (1).

Следуя [3], физические соотношения – связь между обобщенными усилиями и деформациями – приняты в виде следующей матрицы жесткости:

$$\begin{vmatrix} M \\ N \\ S \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \chi \\ \varepsilon \\ \gamma \end{vmatrix}, \tag{3}$$

где  $D_{11} = (C_{11}C_{33}-C_{13}^2)/B$ ;  $D_{12} = -(C_{12}^*C_{13}-C_{23}^*C_{11})/B$ ;

$D_{13} = (C_{12}^*C_{13}-C_{23}^*C_{11})/B$ ;  $D_{21} = -(C_{12}^*C_{33}-C_{23}^*C_{13})/B$ ;

$D_{22} = (B_{22}C_{33}-C_{23}B_{23})/B$ ;  $D_{23} = -(B_{22}C_{13}-C_{11}B_{23})/B$ ; \tag{4}

$D_{31} = (B_{12}C_{13}-C_{11}B_{23})/B$ ;  $D_{32} = -(B_{22}C_{13}-C_{12}^*B_{23})/B$ ;

$D_{33} = (B_{22}C_{11}-C_{12}^*B_{23})/B$ ;

$B = B_{22}C_{11}C_{33}+C_{12}^*B_{23}C_{13}+C_{23}^*B_{12}C_{13}-B_{22}C_{13}C_{13}-C_{12}^*B_{12}C_{33}-C_{12}^*B_{12}C_{33}-C_{22}^*C_{11}B_{23}$ .

В матрицу (3) включены жесткости, моделируемые характерными элементами с трещинами Э1..Э4. Жесткостные коэффициенты имеют тот же физический смысл и формальное выражение, что и в работе [3], а их вычисление производится с использованием тех же процедур.

Для раскрытия жесткостей, входящих в исходную систему уравнений (1) в неявном виде, использованы интегральные условия равновесия элементарной поперечной полоски (см. рис. 1) в форме работы действующих на нее усилий на возможных перемещениях, за которые принимаются две независимые группы единичных функций перемещений (2). После соответствующих преобразований исходная система уравнений (1) для рассматриваемой складки приведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами:

$$\begin{aligned}
 1. & \int_b D_{22} \sum U_i'''(s) \xi_i(s) \xi_i(s) ds + \int_b D_{23} \sum V_g'''(s) \eta_g(s) \xi_i(s) ds + \\
 & - \int_b D_{11} \sum V_i(s) \chi_i(s) \chi_j(s) ds + D_{32} \sum U_i''(s) \xi_i(s) \xi_i(s) + D_{33} \sum V_g''(s) \eta_g(s) \xi_i(s) + \\
 & N \eta_j(s) + Q f_j(s) - D_{11} \sum V_g(s) \chi_g(s) \varphi_j(s) - D_{11} \sum V_i(s) \chi_i(s) \varphi_j(s) \Big|_0^b + \int_b (\partial q_x / \partial x) \xi_j(s) ds \\
 & + \int_b q_s \eta_j(s) ds + \int_b q_v f_j(s) ds = 0; \\
 2. & \int_b D_{32} \sum U_i''(s) \xi_i(s) \eta_h(s) ds + \int_b D_{33} \sum V_g''(s) \eta_g(s) \eta_h(s) ds + \\
 & \int_b D_{11} \sum V_g(s) \chi_g(s) \chi_h(s) ds - \int_b D_{11} \sum V_i(s) \chi_i(s) \chi_h(s) ds + N \eta_h(s) + Q f_h(s) - \\
 & D_{11} \sum V_g(s) \chi_g(s) \chi_h(s) - D_{11} \sum V_i(s) \chi_i(s) \chi_h(s) \Big|_0^b + \int_b q_s \eta_h(s) ds + \int_b q_v f_h(s) ds = 0; \\
 3. & \int_b \sum V_g(s) \chi_g(s) \mu_m(s) ds + \int_b \sum V_i(s) \chi_i(s) \mu_m(s) ds + \int_b \chi_i(s) \mu_m ds = 0.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Алгебраизация этой системы уравнений выполнена методом неопределенных коэффициентов с использованием усеченных степенных рядов. В результате система разрешающих алгебраических уравнений по определению коэффициентов разложена в степенные ряды:

$$\begin{aligned}
 1. & \sum (\sum a_{ijn} x^n \sum n U_{in} x^{n-1}) + \sum (\sum b_{ijn} x^n \sum n V_{gn} x^{n-1}) + \sum S_{jin} x^n \sum M_{mn} x^n = \sum P_{jn} x^n; \\
 2. & \sum (\sum b_{hin} x^n \sum n U_{in} x^{n-1}) + \sum (\sum r_{hgn} x^n \sum n V_{gn} x^{n-1}) + \sum S_{hin} x^n \sum M_{mn} x^n = \sum Q_{hn} x^n; \\
 3. & \sum (\sum s_{min} x^n \sum n U_{in} x^{n-1}) + \sum (\sum s_{mgn} x^n \sum n V_{gn} x^{n-1}) + \sum v_{lin} x^n \sum M_{mn} x^n = \sum \Theta_{ln} x^n.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Переменные жесткостные и геометрические коэффициенты определяются интегрированием соответствующих единичных эпюр функций поперечного распределения перемещений. Они выбраны непрерывными и удовлетворяющими принятым гипотезам и граничным условиям.

В соответствии с такой моделью на каждой итерации в расчет вводится некоторое сплошное эквивалентное сечение с корректировкой его толщины из условия равенства жесткостей заданной и эквивалентной грани на изгиб в ее плоскости.

В матричной форме система уравнений (3) имеет вид:

$$L \cdot W = P, \tag{7}$$

где  $L$  – блочная матрица жесткостных и геометрических характеристик складчатой системы.

$$L = \begin{pmatrix} A_i & B_g & S_m \\ B_i & R_g & S_m \\ S_m & S_m & \Theta_m \end{pmatrix}. \tag{8}$$

Зависимости для вычисления  $A_i, B_g, B_i, R_g, S_m, \Theta_m$  приведены в работе [4].

$W$  – вектор коэффициентов перемещений и усилий;  $P$  – вектор коэффициентов внешней нагрузки.





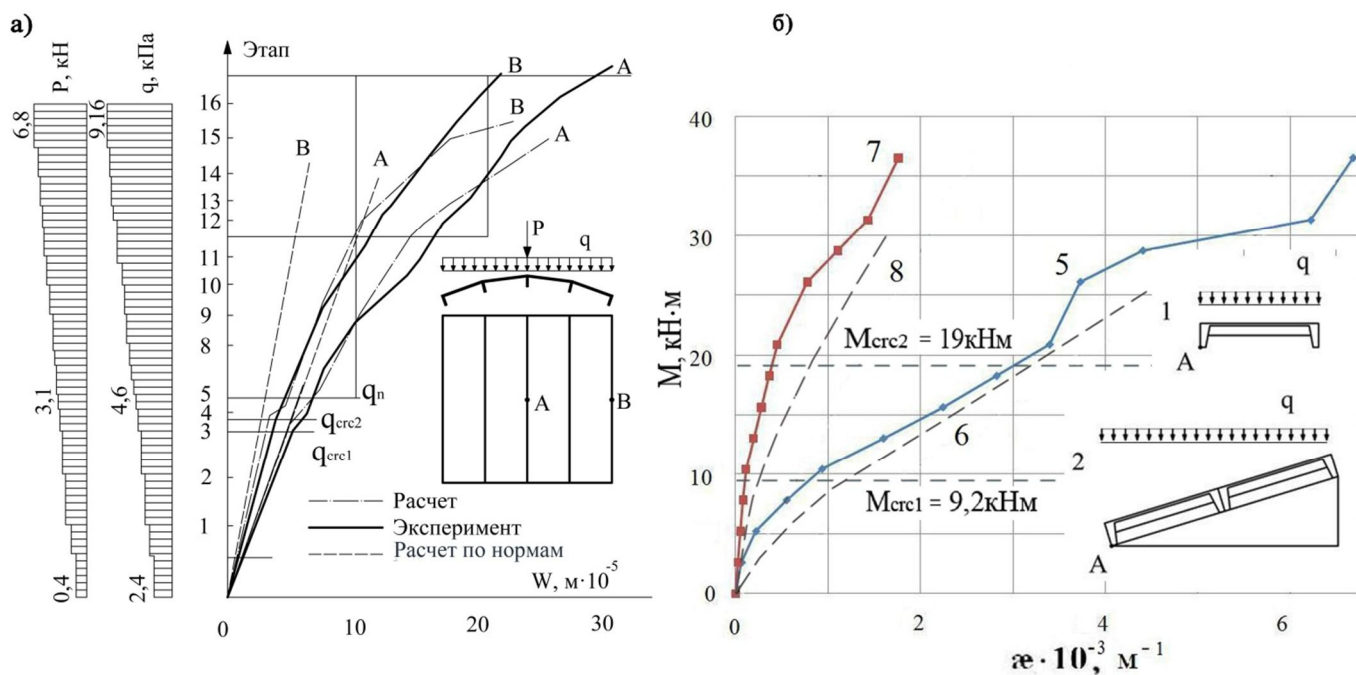


Рисунок 4 – К анализу деформированного состояния и трещиностойкости фрагментов складок: а – рост прогибов в точках А и В; б – зависимость «момент-кривизна» для среднего поперечного сечения крайнего продольного ребра одиночной плиты (кривая 5 – опытная, кривая 6 – расчетная) и плиты в составе фрагмента складки (кривая 7 – опытная, кривая 8 – расчетная)

Учет совместной работы складчатых покрытий как пространственных систем при проектных и запроектных воздействиях позволяет выявить резервы по параметрам предельных состояний I и II групп и в ряде случаев продлить их сроки эксплуатации, не прибегая к кардинальному усилению отдельных несущих конструкций или замене покрытия.

Использование предложенного полуаналитического расчетного аппарата вариационного метода и полученных результатов экспериментальных исследований обеспечивают проведение анализа деформирования, трещиностойкости и разрушения рассматриваемых железобетонных конструктивных систем при проектных и внезапных запроектных воздействиях. В последнем случае для определения динамических догрузений в конструктивной системе целесообразно использовать расчетные зависимости, предложенные в работе [7].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов, В.З. Тонкостенные пространственные системы [Текст] / М.: Госстройиздат, 1958. – 502 с.
2. Голышев, А.Б. Сопротивление железобетона [Текст] / А.Б. Голышев, В.И. Колчунов. – Киев: Основа, 2009. – 432 с.
3. Карпенко, Н.И. О прямых матрицах связей для железобетонных плит [Текст] / Н.И. Карпенко // Пространственные конструкции зданий и сооружений, 1985 – №5. – С. 24-36.
4. Милейковский, И.Е. Рекомендации по выбору расчетных схем и методов расчета оболочек покрытий [Текст] / И.Е. Милейковский, В.И. Колчунов, А.А. Соколов. – М., 1987. – 177 с.
5. Колчунов, В.И. Жесткость и трещиностойкость железобетонных складчатых покрытий [Текст] / В.И. Колчунов, Е.В. Осовских // Известия вузов. Строительство. – 1993. – №2. – С. 118-123.
6. Осовских, Е.В. Исследование железобетонных складчатых покрытий в запредельных состояниях [Текст] / Е.В. Осовских, В.И. Колчунов, П.А. Афонин // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – №4. – С. 26-29.
7. Гениев, Г.А. прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях [Текст] / Г.А. Гениев, В.И. Колчунов, Н.В. Ключева [и др.]. – М.: АСВ, 2004. – 216 с.

**Осовских Евгений Васильевич**

Орловский академический научно-творческий центр РААСН, г. Орел

Кандидат технических наук

E-mail: jane\_wasp@mail.ru

**Колчунов Виталий Иванович**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс», г. Орел  
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции и материалы»  
E-mail: skimkafedra@yandex.ru

**Афонин Павел Алексеевич**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Аспирант  
E-mail: pashy16@yandex.ru

---

E.V. OSOVSKIY, V.I. KOLCHUNOV, P.A. AFONIN

**STRAINING, CRACK GROWTH AND FAILURE OF OPERATING  
REINFORCED CONCRETE PRIZMATIC FOLDED ROOFS  
IN LIMIT AND OUT-OF-LIMIT STATES**

*The paper presents some proposals to design calculation of reinforced concrete folded-plate roofs considering the actions beyond design basis. In addition to a calculation method for strain and failure analysis of reinforced concrete folded-plate structures the authors use variation method of Vlasov with combination of gradual loading method.*

**Keywords:** reinforced concrete folded-plate roofs, straining, out-of-limit state, failure, structural safety.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Vlasov, V.Z. Tonkostennye prostranstvennye sistemy [Tekst] / M.: Gosstrojizdat, 1958. – 502 s.
2. Golyshev, A.B. Soprotivlenie zhelezobetona [Tekst] / A.B. Golyshev, V.I. Kolchunov. – Kiev: Osnova, 2009. – 432 s.
3. Karpenko, N.I. O prjamyh matricah svyazej dlja zhelezobetonnyh plit [Tekst] / N.I. Karpenko // Prostranstvennye konstrukcii zdaniy i sooruzhenij, 1985 – №5. – S. 24-36.
4. Milejkovskij, I.E. Rekomendacii po vyboru raschetnyh shem i metodov rascheta obolochek pokrytij [Tekst] / I.E. Milejkovskij, V.I. Kolchunov, A.A. Sokolov. – M., 1987. – 177 s.
5. Kolchunov, V.I. Zhestkost' i treshhinostjost' zhelezobetonnyh skladchatyh pokrytij [Tekst] / V.I. Kolchunov, E.V. Osovskih // Izvestija vuzov. Stroitel'stvo. – 1993. – №2. – S. 118-123.
6. Osovskih, E.V. Issledovanie zhelezobetonnyh skladchatyh pokrytij v zapredel'nyh sostojanijah [Tekst] / E.V. Osovskih, V.I. Kolchunov, P.A. Afonin // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2011. – №4. – S. 26-29.
7. Geniev, G.A. prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnyh konstrukcij pri zaproektnyh vozdeystvijah [Tekst] / G.A. Geniev, V.I. Kolchunov, N.V. Kljueva [i dr.]. – M.: ASV, 2004. – 216 s.

**Osovskiy Evgenie Vasilevich**

Oryol academic scientific and creative center of RAABS, Orel  
Candidate of technical science  
E-mail: jane\_wasp@mail.ru

**Kolchunov Vitalij Ivanovich**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Doctor of technical sciences, professor, head of department «Construction structures and materials»  
E-mail: skimkafedra@yandex.ru

**Afonin Pavel Alekseevich**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Post-graduate student  
E-mail: pashy16@yandex.ru



ТУРКОВ А.В., МАКАРОВ А.А.

## ПРОГИБЫ И ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМ ПЕРЕКРЕСТНЫХ БАЛОК НА КВАДРАТНОМ ПЛАНЕ С УЧЕТОМ ПОДАТЛИВОСТИ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

*Рассматривается взаимосвязь основной частоты свободных поперечных колебаний  $\omega$  систем перекрестных балок на квадратном плане и их максимальных прогибов  $W_0$  при действии равномерно распределенной нагрузки в зависимости от жесткостных характеристик узловых соединений. Построены зависимости прогибов и частот поперечных колебаний в зависимости от жесткости узловых соединений. Показано, что для квадратной в плане системы перекрестных балок с различными жесткостными характеристиками узловых соединений коэффициент  $K$  с точностью до 3,78% совпадает с аналогичным коэффициентом для квадратных пластин.*

**Ключевые слова:** система перекрестных балок, жесткость узловых соединений, частота собственных колебаний, максимальный прогиб.

В XXI веке в строительстве важнейшую роль играет не только качество выпускаемой продукции, но и оценка несущей способности и жесткости существующих конструкций. Последние годы активно стали развиваться динамические методы диагностики и оценки качества строительных конструкций. Это вызвано обнаружением профессором В.И. Коробко нескольких фундаментальных закономерностей в строительной механике, в основе которых лежат строгие функциональные взаимосвязи между интегральными физическими параметрами строительных конструкций, в частности, между максимальным прогибом нагруженных конструкций в виде балок и пластинок и их основной частотой колебаний в ненагруженном состоянии. Однако, в отличие от пластин цельного сечения, для систем перекрестных балок эта закономерность еще не подтверждена. Решение данной проблемы имеет не только научное, но и практическое значение.

В работе [1] профессор В.И. Коробко вывел фундаментальную зависимость для упругих изотропных пластин постоянной толщины и произвольной формы, которая гласит: вне зависимости от граничных условий произведение максимального прогиба  $W_0$  от действия равномерно распределенной нагрузки  $q$  на квадрат основной частоты колебаний балки в ненагруженном состоянии  $\omega$  с точностью до размерного множителя  $q/m$  есть величина постоянная и соответствует закономерности:

$$W_0 \cdot \omega^2 = K \frac{q}{m}, \quad (1)$$

где  $m$  – равномерно распределенная по площади масса пластины.

В качестве расчетной конструкции была принята система перекрестных балок на квадратном плане 18×18 м (рис. 1). Размер ячейки составлял 3×3 м. Элементы между собой в узлах соединяются с помощью стальных уголков и стальных нагелей (болтов, шпилек). Схема узлов приведена на рисунке 2. По контуру система перекрестных балок опиралась в контурных узлах на шарнирные опоры. Постоянная нагрузка принята от покрытия (клефанерная плита размером 1,48×2,98 м)  $q_{\text{пок}} = 0,156 \text{ кН/м}^2$  и от собственного веса системы перекрестных балок (сечение дощатоклееных элементов системы принято постоянным  $b \times h = 160 \times 1221 \text{ мм}$ )  $q_{\text{св}} = 0,187 \text{ кН/м}^2$ . Снеговая нагрузка принималась  $S_g = 1,8 \text{ кН/м}^2$ . Суммарная равномерно распределенная статическая нагрузка составила  $q = 2,143 \text{ кН/м}^2$ . Для определения собственных частот колебаний в узлы системы прикладывались сосредоточенные грузы, интенсивность которых рассчитывалась по фактическому собственному весу конструкции и составил  $G = 0,51 \text{ кН}$ . Модуль упругости древесины в расчетах принимался по нормам [2]  $E = 10000 \text{ МПа}$ .

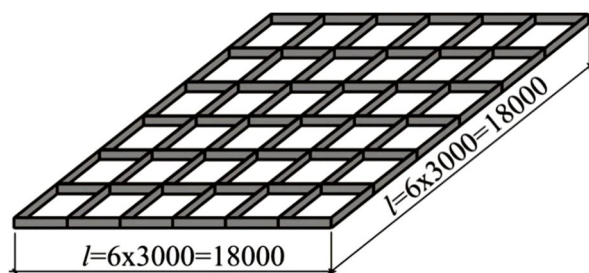


Рисунок 1 – Схема системы перекрестных балок на квадратном плане

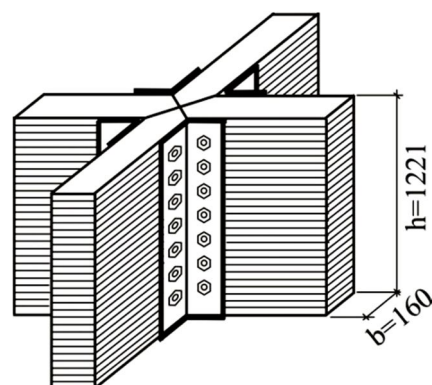


Рисунок 2 – Узел примыкания элементов

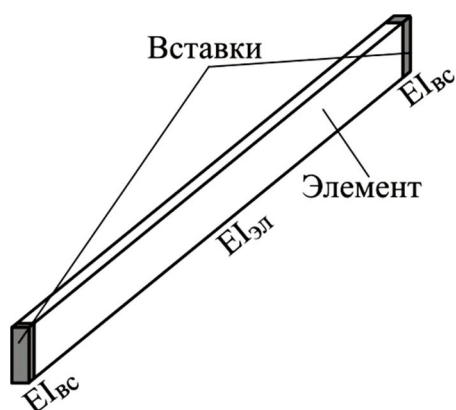


Рисунок 3 – Схема элемента с вставками

Для оценки степени влияния податливости узловых соединений разработан конечный элемент с вставками по концам (рис. 3). Длина каждого такого конечного элемента составляет  $l_1 = 3$  м, длина вставки принята  $0,01l_1 = 0,03$  м. Изгибная жесткость элемента соответствовала жесткости дощатоклееного сечения  $b \times h = 160 \times 1221$  мм (сечение по высоте набрано из 37 досок толщиной 33 мм), а изгибная жесткость вставок изменялась в диапазоне  $EI_{вс}/EI_{эл}$  от 0 (в практических расчетах принято соотношение 0,0001) до 1. Очевидно, что при соотношении жесткости вставки к жесткости элемента  $EI_{вс}/EI_{эл} = 0$  в узлах системы перекрестных балок образуется шарнир, а при  $EI_{вс}/EI_{эл} = 1$  податливость в узлах отсутствует. При статическом расчете нагрузки были приложены в узлы.

Исследования проводились методом конечных элементов. Расчет выполнялся в программном комплексе SCAD. В результате расчета определялся максимальный прогиб и основная частота поперечных колебаний системы перекрестных балок. Результаты расчета шарнирно опертой по контуру конструкции приведены в таблице 1. По данным таблицы 1 построены графики изменения прогибов и частот колебаний, а также коэффициента  $K$  в зависимости от соотношения изгибной жесткости вставки к жесткости элемента  $EI_{вс}/EI_{эл}$  (рис. 4 и 5).

Таблица 1 – Результаты численных исследований системы перекрестных балок размером в плане  $18 \times 18$  м с размером ячеек  $3 \times 3$  м, шарнирно опертой по контуру

№ п/п	$EI_{вс}/EI_{эл}$	Максимальный прогиб, $W_0$ (мм)	Максимальная частота колебаний, $\omega$ (1/с)	$K = W_0 \omega^2 / (q/m)$	$K_{аналит}$	Отклонение $\Delta$ (%)
1	0,0001	4562,56	1,809141	1,522244	1,582	3,78
2	0,001	475,49	5,604533	1,522478		3,76
3	0,005	112,2	11,54101	1,523391		3,70
4	0,008	78,14	13,83164	1,523883		3,67
5	0,01	66,79	14,96252	1,524234		3,65
6	0,03	36,51	20,24703	1,525687		3,56
7	0,05	30,46	22,17358	1,526625		3,50
8	0,1	25,92	24,04383	1,527472		3,45
9	0,2	23,65	25,17578	1,528016		3,41
10	0,3	22,89	25,59017	1,527999		3,41
11	0,5	22,29	25,93684	1,528534		3,38
12	0,6	22,13	26,02573	1,527982		3,41
13	0,8	21,94	26,13814	1,527977		3,41
14	1	21,83	26,20629	1,528254		3,39

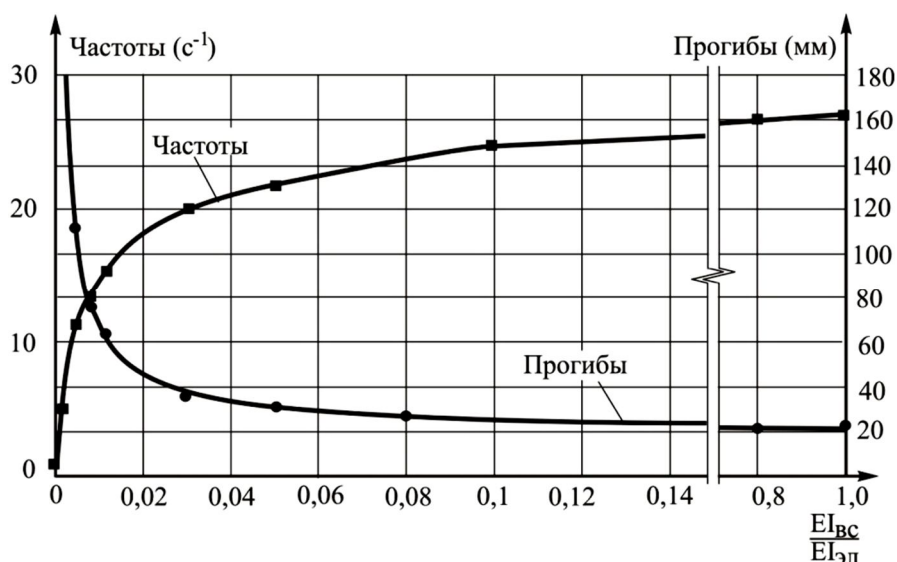


Рисунок 4 – Изменение частот собственных колебаний и прогибов в зависимости от соотношения жесткости вставки к жесткости элемента

По результатам таблицы 1 также построен график значений коэффициента  $K$  в зависимости от соотношения жесткости вставок к жесткости элемента (рис. 5).

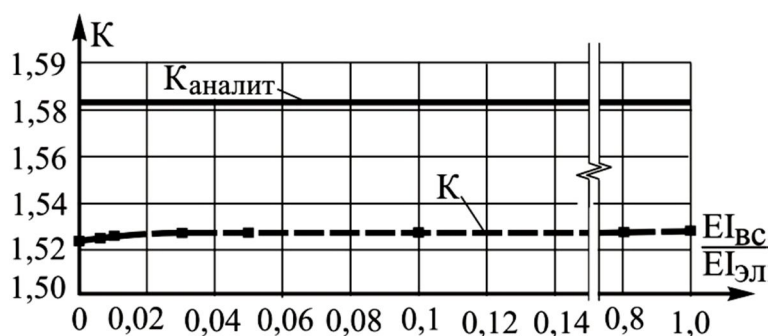


Рисунок 5 – Изменение коэффициента  $K$  в зависимости от соотношения жесткости вставки к жесткости элемента

Анализ данных показывает, что зависимость (1) справедлива для систем перекрестных балок на квадратном плане, при этом коэффициент  $K$  с точностью от 3,38% до 3,78% соответствует аналитическому значению  $K_{аналит}$ .

Отклонение фактических значений коэффициента  $K$  от аналитического вычислялось по формуле  $\Delta = \frac{K_{аналит} - K}{K_{аналит}} \cdot 100\%$ .

### Закключение

В результате исследований подтверждена зависимость (1) для упругих систем перекрестных балок на квадратном плане для всего диапазона податливости узловых связей. Результаты численных исследований показали достаточно хорошее совпадение по коэффициенту  $K$ ; отклонение от аналитического значения коэффициента составило от 3,38% до 3,78% при шарнирном опирании системы по контуру.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробко, В.И. Об одной «замечательной» закономерности в теории упругих пластинок [Текст] / В.И. Коробко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1989. – №11. – С. 32-36.

2. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции [Текст]. – М.: Стройиздат, 1982. – 66 с.

**Турков Андрей Викторович**

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

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Городское строительство и хозяйство»

**Макаров Артем Алексеевич**

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

Инженер

---

A.V. TURKOV, A.A. MAKAROV

## DEFLECTIONS AND FREQUENCIES OF OWN FLUCTUATIONS OF SYSTEMS CROSS BEAMS ON THE SQUARE PLAN TAKING INTO ACCOUNT PLIABILITY OF NODAL CONNECTIONS

*The relation of the fundamental frequency  $\omega$  of free transverse vibrations of systems of cross beams on a square plan and the maximum deflection of the action  $W_0$  evenly spread the load is depending on the stiffness characteristics of nodal connections. Dependences of deflections and frequencies of transverse oscillations depending on the hardness of the nodal connections. It is shown that for a square in terms of cross-beams with different rigidity characteristics narrow lovyh connections ratio to up to 3.78% with the same ratio for square plates.*

**Keywords:** cross-beams, the stiffness of joints for, own-frequency oscillations, the maximum deflection.

## BIBLIOGRAPHY

1. Korobko, V.I. Ob odnoj «zamechatel'noj» zakonomernosti v teorii uprugih plastinok [Tekst] / V.I. Korobko // Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. – 1989. – №11. – S. 32-36.
2. SNiP II-25-80. Derevjannye konstrukcii [Tekst]. – М.: Strojizdat, 1982. – 66 s.

**Turkov Andrey Viktorovich**

State university – educational-science-production complex, Orel

Doctor of technical sciences, head of department «Urban construction and management»

**Makarov Artem Alekseevich**

State university – educational-science-production complex, Orel

Engineer

УДК 004.78:656.13

БАКАЕВА Н.В., ШИШКИНА И.В.

### **КРИТЕРИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА НА ОСНОВЕ БИОСФЕРОСОВМЕСТИМЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*Дано многокомпонентное представление автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства в виде природо-социо-технической системы. Построен критерий экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры системы жизнеобеспечения городского хозяйства и реализован алгоритм расчета показателя биосферной совместимости урбанизированной территории на примере автотранспортного предприятия. В зависимости от полученного расчетного значения предложена новая классификация объектов автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства, которая может быть положена в основу разработки рекомендаций по экологической реконструкции. Составлена картографическая информация о расположении объектов автотранспортной инфраструктуры с указанием классов их экологической безопасности и выполнен анализ экологической ситуации на примере одного из городов.*

**Ключевые слова:** урбанизированная территория, автотранспортная инфраструктура, биосферная совместимость, критерий экологической безопасности, класс экологической безопасности.

В последнее время проблема повышения экологической безопасности городского и транспортного строительства становится все злободневнее. Одним из наиболее значимых направлений решения данной проблемы является снижение загрязнения окружающей природной среды отходами, образующимися от подвижных и стационарных источников объектов транспортного назначения как составной части городского хозяйства. На сегодняшний день автотранспорт и объекты автотранспортной инфраструктуры в городах создают порядка 70...90% всех отходов и выбросов, превращая их в центры основных экологических проблем [1]. К объектам автотранспортной инфраструктуры относятся автотранспортные средства, автомобильные дороги, а также автотранспортные предприятия и предприятия дорожного сервиса, реализующие, с одной стороны, удовлетворение потребностей населения в безопасных и качественных транспортных услугах, с другой стороны, оказывающие значительное техногенное воздействие на природную среду и участвующие в формировании неблагоприятной экологической обстановки.

В основу решения задачи формирования нового концептуального подхода к регулированию техногенных нагрузок на экосистему города, в т.ч. и от автотранспортной инфраструктуры, предлагается принять парадигму биосферной совместимости поселений, базирующуюся на теории гомеостатического взаимодействия природы, общества и человека [2, 3]. В качестве биосферосовместимых технологий при обеспечении экологической безопасности городской среды и экологической реконструкции территорий городской застройки признаются лишь те, которые не наносят вреда окружающей среде и увеличивают потенциал жизни чистой биосферы при их применении.

На основе руководящих принципов парадигмы биосферной совместимости и системного многокомпонентного представления построена концептуальная модель экологически безопасной автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства как природо-социо-технической системы (рис. 1), включающая следующие составляющие:

- природную составляющую как часть внешней среды, предоставляющую ресурсы и подвергающуюся негативному воздействию от автотранспорта;
- социальную составляющую как часть внешней среды, занятую в транспортной сфере и ожидающую удовлетворения своих потребностей в транспортных услугах. Кроме того, человек как представитель социума, являясь частью природной среды, опосредованно испытывает на себе негативное техногенное воздействие;
- автотранспортную составляющую, оказывающую силовое воздействие на природную и социальную среды и определяющую возможность формирования неблагоприятной экологической обстановки на определенной территории и комфортной и безопасной среды жизнедеятельности.

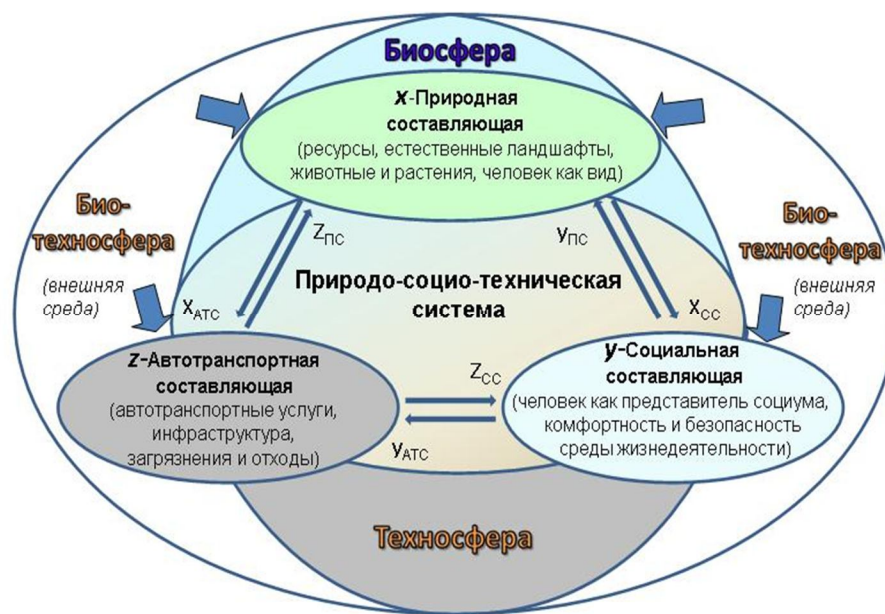


Рисунок 1 – Концептуальная модель экологически безопасной автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства как природо-социо-технической системы

Сформулированный академиком В.А. Ильичевым принцип составления и расчета тройственных или гуманитарных балансов биотехносферы урбанизированных территорий [2, 3] полагаем справедливым для расчета балансов составляющих ограниченных городских территорий, в т. ч. и локальных систем. В этом случае количественное выражение составляющих этого баланса можно расценивать как обобщенный критерий оценки их состояния.

Для природо-социо-технической структуры автотранспортной системы под балансом ее состояния будем понимать некоторую расчетную пропорцию на текущий момент времени между:

- потенциалом биосферы (природной составляющей);
- элементами автотранспортной инфраструктуры как местами удовлетворения потребностей населения (автотранспортной составляющей);
- человеческим потенциалом, реализуемым в области жизнедеятельности (социальной составляющей).

Соотношение между составляющими баланса должно быть таково, чтобы было возможно их симбиотическое соединение, определяющее состояние биосферной совместимости, при котором происходит сохранение (а при необходимости – восстановление) биосферы регионов и на этой основе развитие человеческого потенциала, либо – деградация биосферы и снижение качества жизни населения городов и поселений.

Математическая модель природо-социо-технической структуры как сложной динамической системы в общем виде может быть описана нелинейным уравнением вида:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n), i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $f_i$  – непрерывные или кусочно-непрерывные функции;  $x_n$  – координаты системы, отража-

ющие положение некоторой точки на фазовой плоскости или в пространстве координат, и характеризующие состояния составляющих системы в любой момент времени.

Для расчета гуманитарного баланса на основе представления (1) должны быть формализованы различные процессы, ситуации, состояния и их сочетания, взаимодействия факторов, структурированные и систематизированные по принципам матрицы преобразования города в биосферосовместимый и развивающий человека [2, 3]. Сами по себе отдельные процессы и функциональные зависимости, их описывающие, известны, многие из них нормированы, тем не менее, статистически большинство не зафиксированы ни по городам, ни по историческим периодам какого-либо одного города в соотношении с уровнем развития человеческого потенциала. Это одна из важнейших задач предстоящих исследований в этом направлении с тем, чтобы определить оптимальные показатели и целенаправленно внести соответствующие изменения в механизмы управления городом.

С целью разработки алгоритма реализации такой задачи формализуем состояние природо-социо-технической системы моделью тройственного баланса ее составляющих. Представим исследуемую динамическую модель совокупностью трех нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = xF_1(x, y, z), \\ \frac{dy}{dt} = yF_2(y, x, z), \\ \frac{dz}{dt} = zF_3(z, x, y), \end{cases} \quad (2)$$

где  $F_1(x, y, z), F_2(y, x, z), F_3(z, x, y)$  – нелинейные функции, отражающие в общем виде влияние внутренних взаимодействий между составляющими  $x, y$  и  $z$  системы и внешних воздействий на динамику системы.

Применительно к рассматриваемой природо-социо-технической структуре динамическая модель тройственного баланса может быть описана следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = xF_1(x, z_{ПС}, y_{ПС}), \\ \frac{dy}{dt} = yF_2(x_{СС}, y, z_{СС}), \\ \frac{dz}{dt} = zF_3(x_{ПТС}, y_{ПТС}, z), \end{cases} \quad (3)$$

где  $\frac{dx}{dt}$  – темп изменения состояния природной составляющей природо-социо-технической

структуры;  $\frac{dy}{dt}$  – темп изменения состояния социальной составляющей природо-социо-

технической структуры;  $\frac{dz}{dt}$  – темп изменения состояния автотранспортной составляющей при-

родо-социо-технической структуры;  $F_1(x, y_{ПС}, z_{ПС}), F_2(x_{СС}, y, z_{СС}), F_3(x_{ПТС}, y_{ПТС}, z)$  – нелинейные функции;  $x$  – множество состояний природной составляющей;  $y_{ПС}$  – воздействия социальной составляющей на природную среду;  $z_{ПС}$  – воздействия производственно-технической составляющей на природную среду;  $y$  – множество состояний социальной составляющей;  $x_{СС}$  – воздействия природной составляющей на социальную среду;  $z_{СС}$  – воздействия производственно-технической составляющей на социальную среду;  $z$  – множество состояний производственно-технической составляющей;  $y_{ПТС}$  – воздействия социальной составляющей на автотранспортную составляющую;  $x_{ПТС}$  – воздействия природной составляющей на автотранспортную составляющую.

Для формализации состояния рассматриваемой системы был использован теоретико-множественный подход, определяющий введенные на рисунке 1 параметры:

$X$  – множество состояний природной составляющей, которые зависят от воздействия на нее: объектов автотранспортной инфраструктуры и человека как части социума;



$Z$  – множество состояний автотранспортной составляющей, которые будут определяться объектами, представляющими автотранспортную инфраструктуру городского хозяйства, и параметрами, характеризующими эти объекты;

$Y$  – множество состояний социальной составляющей, характеризующиеся как «человеческий потенциал» в составе рассматриваемой системы, и зависящие от воздействия двух других составляющих.

Взаимодействия в составе анализируемой природо-социо-технической системы описываются множествами:

$X_{ATC}, X_{CC}$  – множества воздействий природной составляющей на автотранспортную и социальную составляющие: ( $X_{ATC}, X_{CC} \subset X$ );

$Z_{PC}, Z_{CC}$  – множества воздействий автотранспортной составляющей на природную и социальную составляющие: ( $Z_{PC}, Z_{CC} \subset Z$ );

$Y_{ATC}, Y_{PC}$  – множества воздействий социальной составляющей на автотранспортную и социальную составляющие: ( $Y_{ATC}, Y_{PC} \subset Y$ ).

Для автотранспортной составляющей в качестве критерия экологической безопасности предлагается показатель биосферной совместимости урбанизированной территории [4], учитывающий балансовые соотношения между фактическими параметрами биосферы и техносферы, значение которого можно представить в виде коэффициента [5]:

$$\eta_{ATC} = \sum_k \sum_i [(B_{ik} - Z_{ik})], \quad (4)$$

где  $B_{ik}$  – количественное значение части биосферы при воздействии на нее  $k$ -х элементов автотранспортной инфраструктуры (далее АТС);  $Z_{ik}$  – количественное значение  $i$ -х загрязняющих веществ (ЗВ), образующихся от воздействия  $k$ -х элементов АТС с максимальными концентрациями, допускающими развитие (МКДР) территорий.

Количественное значение части биосферы  $B_{ik}$  определяется по формуле:

$$B_{ik} = \frac{S_{iB}}{S_{ik}} \cdot \xi_{ik} \cdot K_{oz}, \quad (5)$$

где  $\frac{S_{iB}}{S_{ik}}$  – относительное значение требуемой площади части биосферы по отношению к площади элемента АТС, необходимой для нейтрализации  $i$ -х ЗВ от воздействия  $k$ -х элементов АТС до уровня МКДР, м<sup>2</sup>;  $\xi_{ik}$  – коэффициент однородности биосферы, учитывающий различные интенсивности выбросов и возможность приведения их к одному источнику;  $K_{oz}$  – коэффициент озеленения территории.

В свою очередь, количественное значение  $i$ -х ЗВ, образующихся от воздействия  $k$ -х элементов АТС, рассчитывается по формуле:

$$Z_{ik} = W_{ik} \cdot \chi_{ik} \cdot K_c \cdot m_{ik} \cdot K_{эз} \cdot K_{он}, \quad (6)$$

где  $W_{ik}$  – относительное значение параметра  $i$ -х загрязнений от воздействия  $k$ -х элементов АТС, рассчитываемое для территории распространения ЗВ;  $\chi_{ik}$  – количество элементов АТС, создающих загрязнения на рассчитываемой территории;  $K_c$  – коэффициент, зависящий от наличия нескольких источников загрязнения в радиусе санитарно-защитной зоны и учитывающий синергетический эффект;  $m_{ik}$  – коэффициент снижения выбросов  $i$ -го ЗВ от  $k$ -го элемента АТС в результате осуществления природоохранных мероприятий;  $K_{эз}$  – коэффициент экологической значимости территории;  $K_{он}$  – коэффициент экологической опасности  $i$ -го ЗВ.

Относительное значение требуемой площади части биосферы, необходимой для нейтрализации  $i$ -х ЗВ от воздействия  $k$ -х элементов АТС может быть определено по формуле:

$$S_{iB} = ((V_{ik} / \chi_{ik}) / K_{ik}), \quad (7)$$

где  $V_{ik}$  – объем  $i$ -х ЗВ от  $k$ -х элементов АТС, т/год;  $\chi_{ik}$  – количество элементов АТС, загрязнение от которых на рассчитываемой территории может быть поглощено биосферой;  $K_{ik}$  – количество ЗВ, утилизируемых 1 м<sup>2</sup> биосферы, т/год.

Значение параметра ЗВ от воздействия  $k$ -х элементов АТС, соотнесенное к площади загрязненной территории в соответствии с радиусом санитарно-защитной зоны, рассчитывается по формуле:



$$W_{ik} = V_{ik}^{\delta cm} \cdot \Delta S_{ik}^{\delta cm} / V_{ik} \cdot S_{ik}^{мер}, \quad (8)$$

где  $V_{ik}^{\delta cm}$  – объем  $i$ -х ЗВ от  $k$  – х элементов АТС с учетом применения биосферосовместимых технологий, т/год;  $\Delta S_{ik}^{\delta cm}$  – изменение площади зоны распространения ЗВ с учетом применения биосферосовместимых технологий, м<sup>2</sup>;  $S_{ik}^{мер}$  – площадь загрязненной территории от  $k$ -х элементов АТС в соответствии с радиусом санитарно-защитной зоны, м<sup>2</sup>.

Предложенный в работе [6] показатель биосферной совместимости урбанизированной территории  $\eta$  является относительной величиной и находится в интервале:  $0 \leq \eta \leq 1$ . При приближении значения показателя биосферной совместимости к единице обеспечивается рост главной производительной силы – биосферы, а в случае приближения к нулю – имеет место регрессивное развитие территории, т.е. ее деградация вследствие техногенного загрязнения. Этот показатель был принят в качестве критерия экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства. В зависимости от полученного расчетного значения устанавливается один из четырех классов экологической безопасности (табл. 1).

Таблица 1 – Классы экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры

Значение показателя биосферной совместимости территории автотранспортной инфраструктуры $\eta_{АТС}$	Менее 0,30	0,31-0,55	0,56-0,85	Свыше 0,86
Класс экологической безопасности	IV	III	II	I

Класс экологической безопасности I отражает такое состояние урбанизированной территории, при котором воздействие автотранспортной инфраструктуры и внедрение биосферосовместимых технологий соответствует минимуму ущерба для окружающей среды и обеспечивает комфортность среды жизнедеятельности. Устанавливается в соответствии с четвертой категорией автотранспортного предприятия по воздействию его на атмосферный воздух, определенной в соответствии с [7] (когда суммарная концентрация загрязняющих веществ не превосходит нормативных значений).

Класс безопасности II характеризует такое состояние урбанизированной территории, при котором воздействие автотранспортной инфраструктуры и внедрение биосферосовместимых технологий обеспечивают приемлемый ущерб для окружающей среды, для устранения которого требуются незначительные материальные и временные ресурсы. Устанавливается в соответствии с третьей категорией автотранспортного предприятия по воздействию его на атмосферный воздух (когда суммарная концентрация отдельно взятых загрязняющих веществ превосходит нормативные значения).

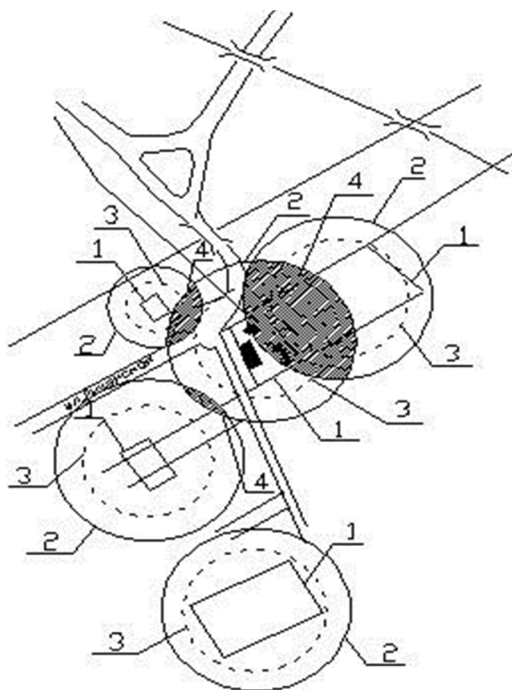
Класс безопасности III характеризует такое состояние урбанизированной территории, при котором воздействие автотранспортной инфраструктуры и отсутствие биосферосовместимых технологий обеспечивают значительное техногенное воздействие на окружающую среду и дискомфорт среды жизнедеятельности, на устранение которых потребуются значительные ресурсы, время и внедрение инновационных программ развития. Устанавливается в соответствии со второй категорией автотранспортного предприятия по воздействию его на атмосферный воздух (когда суммарная концентрация практически всех загрязняющих веществ превосходит нормативные значения).

Класс безопасности IV характеризует такое состояние урбанизированной территории, при котором воздействие автотранспортной инфраструктуры и отсутствие биосферосовместимых технологий обеспечивают максимальный ущерб для окружающей среды, ее деградацию и регрессивное развитие территории в целом. Устанавливается в соответствии с первой категорией автотранспортного предприятия по воздействию его на атмосферный воздух (когда суммарная концентрация всех загрязняющих веществ или отдельно взятых значительно превосходит нормативные значения). Данный класс безопасности не допустим, территория является зоной экологического риска или зоной чрезвычайной ситуации, требует принятия безотлагательных мер. С учетом расчетных значений критерия и установленного в соответствии с ними класса экологической безопасности объектов автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства могут быть даны заключения в виде рекомендаций по их экологической

реконструкции и возможности на этом основании перевода конкретного объекта в категорию экологически безопасного.

Расчет показателя биосферной совместимости был выполнен применительно к объектам автотранспортной инфраструктуры г. Орла, определенного официальными источниками информации как города с благоприятной экологической обстановкой. Исходные данные к расчету были определены в ходе проведения инвентаризации выбросов от станции технического обслуживания автомобилей ЗАО «Орелоблавтотехобслуживание».

Экологическая ситуация в районе ул. Ливенской усугубляется не только функционированием рассматриваемого предприятия, но и образованием зон наложения ЗВ (рис. 2, поз. 4) ввиду взаимодействия выбросов сразу нескольких предприятий: АЗС, ПАТП-1, ОАО «Орелавтотранссервис» и автосалона «Daewoo». Поэтому, целесообразно в расчетах принимать прирост площади территории распространения ЗВ до уровня МКДР (рис. 2, поз. 2).



*Рисунок 2 – Схема распространения загрязнений в районе ЗАО «Орелоблавтотехобслуживание» по ул. Ливенской: 1 – источники ЗВ; 2 – границы распространения ЗВ при существующих технологиях до уровня МКДР; 3 – границы распространения ЗВ при применении природоохранных мероприятий и внедрении биосферосовместимых технологий; 4 – зоны наложения ЗВ от нескольких источников*

Общая площадь территории  $S^{тер}$ , занимаемой предприятием и его инфраструктурой в пределах радиуса санитарно-защитной зоны, составляет 8968 м<sup>2</sup>. Прирост площади составил 3000 м<sup>2</sup>.

На территории ЗАО «Орелоблавтотехобслуживание» выявлено 24 источника загрязнения атмосферы. Среди них: пост диагностирования, уборочно-моечный участок, зона технического осмотра и ремонта, кузовной участок, малярный участок, склад и открытые стоянки.

Согласно отчетности в год предприятием обслуживается по всем участкам в среднем 6 000 легковых автомобилей с бензиновыми и дизельными двигателя внутреннего сгорания.

Расчет валовых и максимально разовых выбросов ЗВ производился с использованием удельных показателей, т.е. количества выделяемых ЗВ, приведенных к единице используемого оборудования рабочих постов согласно методическим указаниям [8]. Установили, что в атмосферу попадает 19 ингредиентов ЗВ, среди которых наиболее характерными являются: оксид углерода – CO, углеводороды – CH, оксид азота – NO<sub>x</sub> в пересчете на диоксид азота – NO<sub>2</sub>, твердые частицы – С, соединения серы в пересчете на диоксид серы – SO<sub>2</sub> и соединения свинца – Pb.

Эффектом суммации обладают: азота диоксид, свинец и его соединения, ангидрид сернистый и фтористый водород. Сумма всех выбросов по предприятию составляет 1,409374 т/год.

Значение показателя биосферной совместимости для ЗАО «Орелоблавтотехобслуживание» определяется из соотношения [5]:

$$\eta_{ATC} = \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^{19} \left( \frac{S_{iB}}{S_{ik}} \cdot \xi_{ik} \cdot K_{93} \right) - ((W_{ik} \cdot \chi_{ik} \cdot \gamma_{ik} + \Delta m N_{ATC}) K_{93} K_{on} K_c = \left( \frac{5,59}{4} \cdot 1,0 \cdot 0,3 \right) - (0,08) = 0,42 - 0,08 = 0,34.$$

Полученное значение свидетельствует о том, что обследуемое предприятие соответствует III классу экологической безопасности, и характеризуется значительным техногенным воздействием на окружающую среду ввиду практически полного отсутствия биосферосовместимых технологий и синергетическим эффектом от взаимодействия сразу нескольких источников в пределах радиуса санитарно-защитной зоны.

Предложенный с позиции биосферной совместимости критерий экологической безопасности позволяет оценивать степень негативного воздействия объектов автотранспортной инфраструктуры на окружающую среду, и может явиться основой для реформирования действующей нормативно-правовой базы, т.к. существующие методы оценки экологической безопасности (с учетом ПДК, ПДВ и т.д.) определяют загрязненность рассматриваемых территорий, но не учитывают синергетического эффекта от нескольких источников выбросов и возможность биосферы к самовосстановлению. Кроме того, разработанный критерий экологической безопасности может быть положен в основу экологической сертификации объектов автотранспортной инфраструктуры с целью обеспечения безопасного осуществления хозяйственной и градостроительной деятельности.

Разработанная классификация объектов автотранспортной инфраструктуры с позиции экологической безопасности нашла отражение в виде картографической информации. Так, на рисунке 3 схематично изображены объекты автотранспортной инфраструктуры, расположенные в Железнодорожном районе г. Орла с указанием класса экологической безопасности, определенного в ходе численных исследований. Экологическая ситуация, как очевидно из схемы, определяется, в основном, объектами опасными по своей производственной деятельности для окружающей среды.

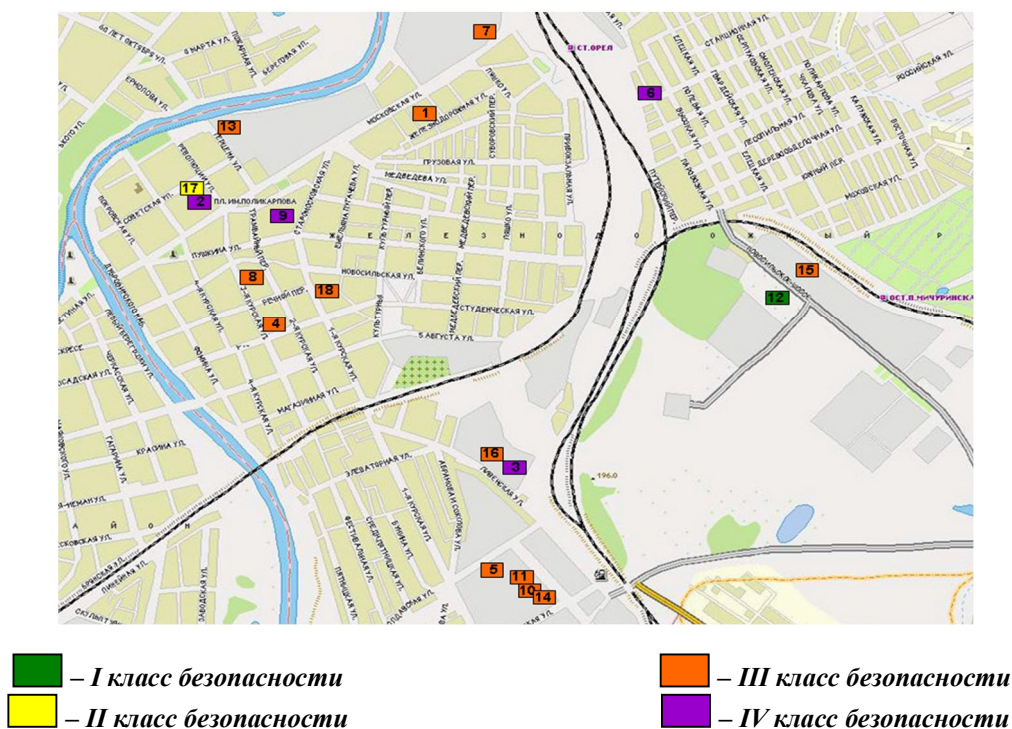


Рисунок 3 – Схема расположения объектов автотранспортной инфраструктуры Железнодорожного района г. Орла с указанием классов их экологической безопасности

В практическом плане информация о таких объектах как градообразующих может найти отражение в территориальных нормах пространственного развития урбанизированных территорий. Наличие в регионе заинтересованных в решении обозначенных проблем профессиональных объединений строителей, архитекторов, градостроителей и работников автомобильного транспорта и учет ими сведений о расположении потенциально опасных объектов автотранспортной инфраструктуры будут способствовать формированию перспективных предложений по корректировке генеральных планов и планов экологической реконструкции урбанизированных территорий автотранспортной инфраструктуры.

Рекомендации по обеспечению экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры системы жизнеобеспечения городского хозяйства, включают целый ряд административных, технических и градостроительных действий, направленных на:

- обеспечение качества окружающей среды в соответствии с действующей нормативно-правовой базой и доведение уровня защиты селитебных и рекреационных территорий от транспортного шума, отработавших газов двигателей внутреннего сгорания и других видов негативного воздействия объектов автотранспортной инфраструктуры до уровня, гарантированного государством в результате природоохранных мероприятий;

- повышение степени планировочной упорядоченности, структуризации улично-дорожной сети и объектов автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства в соответствии с концепцией транспортного обслуживания населения, направленной на удовлетворение рациональных потребностей населения;

- снижение опосредованного влияния загрязнения окружающей среды на здоровье населения и обеспечение социальной защищенности городского населения при удовлетворении рациональных потребностей в качественных и безопасных транспортных услугах.

В целом рекомендации по обеспечению экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства представляют собой последовательность действий, основой которых в соответствии с системой, предложенной академиком В.А. Ильичевым, является применение биосферосовместимых технологий, включающую в себя следующие этапы (рис. 4).

1	Выбор стратегического направления функционирования АТС города на основе единения техносферы и окружающей природы	4	Законодательное и нормативное закрепление предложенных критериев оценки экологической безопасности, в т.ч. и в виде балансовых соотношений	7	Удовлетворение рациональных потребностей человека через функции города и подфункции автотранспортной составляющей.
2	Мониторинг качества городской среды от воздействия автомобильного транспорта и сопоставление объема загрязнений и потребления природных ресурсов и качества жизни	5	Разработка инновационных программ развития отрасли на основе биосферосовместимых технологий и их реализация посредством соответствующих механизмов управления	8	Установление межотраслевых и межсистемных функциональных связей, взаимодействия и сотрудничества профессиональных объединений
3	Составление количественных балансовых соотношений между: 1) элементами АТС как местами удовлетворения потребностей, 2) человеческим потенциалом и 3) потенциалом биосферы и разработка критериев оценки	6	Оценка эффективности программных мероприятий экологической реконструкции объектов автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства с точки зрения развития человека	9	Анализ, выводы и получение новых знаний о правильности выбранных направлений стратегического развития автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства

*Рисунок 4 – Схема реализации предложенных мероприятий по обеспечению экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры системы жизнеобеспечения городского хозяйства*

Отдельной строкой в системе мероприятий по обеспечению экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры системы жизнеобеспечения городского хозяйства следует выделить предложения к программам инновационного развития автотранспортной системы городов.

С учетом разработанных рекомендаций появляется возможность прогнозировать результативность предлагаемых мероприятий по обеспечению экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства, гарантированной защиты селитебных и рекреационных зон от загрязнения ингридиентными выбросами, а также достижение определенного социального эффекта в соответствии с технической политикой транспортного обслуживания городского населения и обеспечением хозяйственно-деловых и потребительских перевозок.

### **Выводы**

На принципах парадигмы биосферной совместимости построена концептуальная модель экологически безопасной автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства как природо-социо-технической системы. Предложен критерий экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры системы жизнеобеспечения городского хозяйства, относительное расчетное значение которого учитывает возможность синергетического эффекта от нескольких источников загрязнений и возможность нейтрализации (восстановительной способности) урбанизированной территории. В зависимости от полученного расчетного значения предложена новая классификация объектов автотранспорта, на основе которой рекомендуются мероприятия по экологической реконструкции.

Численными исследованиями показателя биосферной совместимости урбанизированных территорий автотранспортных предприятий на примере одного из городов, определенного официальными источниками информации как города с благоприятной экологической обстановкой для большинства объектов (две трети обследуемых) установлены достаточно низкие значения этого показателя (менее 0,56). Это обусловлено синергетическим эффектом от взаимодействия сразу нескольких источников загрязнения и практически полным отсутствием внедрения биосферосовместимых технологий, что фактически свидетельствует о значительном техногенном воздействии на биосферу региона.

В зависимости от полученного расчетного значения предложена новая классификация объектов автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства, на основе которой целесообразно принятие управляющих решений и разработка рекомендаций по экологической реконструкции. На основе проведенных исследований разработаны рекомендации по обеспечению экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры системы жизнеобеспечения городского хозяйства.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Бакаева, Н.В. Экологические риски при обслуживании автомобилей [Текст] / Н.В. Бакаева // Мир транспорта. – М., 2009. – №3. – С. 134-139.
2. Ильичев, В.А. Может ли город быть биосферосовместимым и развивать человека? [Текст] / В.А. Ильичев // Архитектура и строительство Москвы. – 2009. – №2 (544). – С. 8-13.
3. Ильичев, В.А. Принципы преобразования города в биосферосовместимый и развивающий человека [Текст] / В.А. Ильичев // Научно-технический и производственный журнал «Промышленное и гражданское строительство». – М.: ООО «Издательство ПГС», 2010. – №6. – С. 3-13.
4. Ильичев, В.А. Некоторые вопросы проектирования поселений с позиции концепции биосферной совместимости [Текст] / В.А. Ильичев, В.И. Колчунов, А.В. Берсенев, А.Л. Поздняков. – Academia, 2009. – №1. – С. 50-57.
5. Бакаева, Н.В. Построение системы оценочных показателей и расчет показателя биосферной совместимости территориальной автотранспортной системы [Текст] / Н.В. Бакаева, И.В. Шишкина // Вестник Московского государственного строительного университета (МГСУ). – М., 2011. – №3. – Т. 1. – С. 434-443.
6. Ильичев, В.А. Некоторые вопросы проектирования поселений с позиции концепции биосферной совместимости [Текст] / В.А. Ильичев, В.И. Колчунов, А.В. Берсенев, А.Л. Поздняков // Academia. – М., 2009. – №1. – С. 50-57.
7. РД 52.04.212-86 (ОНД 86) Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий [Текст]. – М., 1987.
8. Методика инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для автотранспортных предприятий (расчетным методом) [Текст]. – М., 1998.



**Бакаева Наталья Владимировна**

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

**Шишкина Ирина Викторовна**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Строительство автомобильных дорог»  
E-mail: schunya87@yandex.ru

---

N.V. BAKAEVA, I.V. SHISHKINA

**THE BASIC DIRECTIONS OF MAINTENANCE OF ECOLOGICAL  
SAFETY OF THE MOTOR TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE  
OF MUNICIPAL ECONOMY ON THE BASIS  
OF BIOSPHERIC COMPATIBILITY TECHNOLOGIES**

*Multicomponent representation of motor transportation infrastructure of city in the form of priodo-sotsio-technical system is given. The criterion of ecological safety of motor transportation infrastructure of a life support system of city is constructed and the algorithm of calculation of an indicator of biospheric compatibility of the urbanized territory on an example of the motor transportation enterprise is realized. Depending on the received settlement value new classification of objects of motor transportation infrastructure of city which can be based on development of recommendations about ecological reconstruction is offered. Cartographical information on an arrangement of objects of motor transportation infrastructure with the indication of classes of their ecological safety is made and is analysed an ecological situation on an example of one their cities.*

**Keywords:** urbanizing territory, motor transportation system, biosphere compatibility, criterion of ecological safety, grade of ecological safety.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Bakaeva, N.V. Jekologicheskie riski pri obsluzhivanii avtomobilej [Tekst] / N.V. Bakaeva // Mir transporta. – M., 2009. – №3. – S. 134-139.
2. Il'ichev, V.A. Mozhet li gorod byt' biosferosovmestimym i razvivat' cheloveka? [Tekst] / V.A. Il'ichev // Arhitektura i stroitel'stvo Moskvyy. – 2009. – №2 (544). – S. 8-13.
3. Il'ichev, V.A. Principy preobrazovaniya goroda v biosferosovmestimyy i razvivajushhiy cheloveka [Tekst] / V.A. Il'ichev // Nauchno-tehnicheskij i proizvodstvennyj zhurnal «Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo». – M.: OOO «Izdatel'stvo PGS», 2010. – №6. – S. 3-13.
4. Il'ichev, V.A. Nekotorye voprosy proektirovaniya poselenij s pozicii koncepcii biosfernoj sovmestimosti [Tekst] / V.A. Il'ichev, V.I. Kolchunov, A.V. Bersenev, A.L. Pozdnjakov. – Academia, 2009. – №1. – S. 50-57.
5. Bakaeva, N.V. Postroenie sistemy ocenочnyh pokazatelej i raschet pokazatelja biosfernoj sovmestimosti territorial'noj avtotransportnoj sistemy [Tekst] / N.V. Bakaeva, I.V. Shishkina // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta (MGSU). – M., 2011. – №3. – T. 1. – S. 434-443.
6. Il'ichev, V.A. Nekotorye voprosy proektirovaniya poselenij s pozicii koncepcii biosfernoj sovmestimosti [Tekst] / V.A. Il'ichev, V.I. Kolchunov, A.V. Bersenev, A.L. Pozdnjakov // Academia. – M., 2009. – №1. – S. 50-57.
7. RD 52.04.212-86 (OND 86) Metodika rascheta koncentracij v atmosfernom vozduhe vrednyh veshhestv, soderzhashhihsja v vybrosah predpriyatij [Tekst]. – M., 1987.
8. Metodika inventarizacii vybrosov zagriznjajushhih veshhestv v atmosferu dlja avtotransportnyh predpriyatij (raschetnym metodom) [Tekst]. – M., 1998.

**Bakayeva Natalia Vladimirovna**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Candidate of technical science, associate professor of department «Building of highways»  
Ph.: +7 (4862) 73-43-67  
E-mail: natbak@mail.ru

**Shishkina Irina Viktorovna**

State university – educational-science-production complex, Orel  
Candidate of technical science, assistant of department «Building of highways»  
E-mail: schunya87@yandex.ru

БУДАРИН Е.Л.

## АРХИТЕКТУРА ЗАГОРОДНОГО ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛИЩА, ЕГО ТИПЫ И РАЗВИТИЕ НА ЮГЕ РОССИИ

*Рассмотрены типы, разновидности и классификация загородного индивидуального жилища, его развитие на юге России. Предложена система классификации, загородного жилища на три типа: 1) сельские дома; 2) дома компенсационного типа (второе жилище); 3) дома альтернативного типа. Каждый тип делится на разновидности. Анализ сложившейся ситуации на юге России, прежде всего районов Ставропольского края, показал, что предпосылками для формирования загородного малоэтажного жилищного строительства являются выбор типов и видов жилья, конструктивных и технологических схем быстровозводимых зданий и построек, в наибольшей степени удовлетворяющих местным условиям и социальной норме площади жилья для конкретного состава семьи.*

**Ключевые слова:** Загородное индивидуальное жилище; сельские дома; дома компенсационного типа; дома альтернативного типа; конструктивные и технологические схемы зданий; казачий курень.

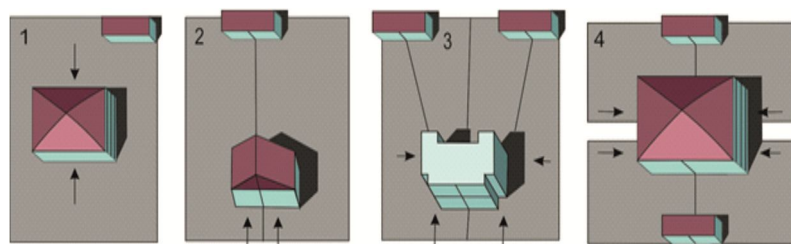
### Введение

В современном российском и мировом строительстве существует большое многообразие различных типов и видов индивидуальных жилых домов. Каждый из них обладает специфическими признаками и отличительными особенностями [2]. Загородное индивидуальное жилище формировалось на протяжении многих веков в зависимости от социально-бытовых факторов, природно-климатических условий, национальных особенностей. Дом на одну семью с земельным участком и дворовыми постройками для сельской местности в прошлом всегда был единственным типом жилища, обеспечивающим удобство ведения усадебного хозяйства, изолированность, возможность организации развитых подсобных помещений и многочисленных хозяйственных построек. В настоящее время многоквартирный дом относится к числу основных типов загородного жилища и наиболее полно соответствует условиям жизни сельского населения. Основной характеристикой для дифференциации загородного жилища выступает социально-экономическая стратификация населения, позволяющая на основе уровня дохода, образа жизни, социального статуса предложить жилище, отвечающее всем требованиям различных групп населения [14]. Определенные признаки позволяют выделить загородное жилище из всей системы жилья и рассмотреть его как отдельный самостоятельный вид проживания.

### Классификация, типы и разновидности загородного жилища

Каждый тип загородного жилища обладает своими устойчивыми характеристиками: набором функций, сезоном и периодом эксплуатации, величиной, оснащением и др.

В зависимости от размещения домов на земельных участках и их взаимосвязей между собой индивидуальные жилые дома классифицируются на два основных класса. К первому классу домов относятся отдельно стоящие дома, а ко второму – блокированные дома (рис. 1).



**Рисунок 1 – Классификация индивидуальных жилых домов: 1 – отдельно стоящие многоквартирные; 2 – отдельно стоящие двухквартирные; 3 – блокированные (спаренные) двухквартирные; 4 – блокированные четырех квартирные;**

Отдельно стоящие дома не имеют общих строительных конструкций фундаментов, стен и покрытия и состоят, в основном, из одной квартиры. Блокированные дома являются зданиями, состоящие из двух или более смежных квартир. Каждая, из квартир имеет непосредственный выход на собственный придомовой земельный участок. Блокированные дома имеют общие строительные конструкции. Придомовой земельный участок – это участок, примыкающий к дому с непосредственным выходом на него [2].

В зависимости от количества квартир, индивидуальные жилые дома делятся на три основных группы. К первой группе относятся многоквартирные дома – на одну семью, ко второй группе – блокированные – двухквартирные (или так называемые спаренные) дома и третьей группе – многоквартирные дома с количеством квартир от трех и более (см. рис. 1). Они бывают как одноэтажные, так и двухэтажные, в том числе мансардные [2].

При дальнейшем комплексном изучении вопросов формирования загородного жилища, при всей совокупности факторов, влияющих на процесс их формирования можно выделить основные группы факторов:

- первая группа – это общие факторы, основные: экологические, социально-экономические и социально-психологические;
- вторая группа – это факторы, которые определяют специфику формирования загородного жилища: природно-климатические, социально-культурные и ландшафтно-рекреационные;
- третья группа – это факторы, которые влияют на местное проектирование, локальные факторы: микроклиматические, психологические и административно-нормативные [14].

Каждый из проанализированных факторов влияет на формирование полноценной жилой среды, их учет позволит принять оптимальное решение при проектировании загородного жилища.

**Загородное жилище представлено тремя типами:**

1. *Сельские дома;*
2. *Дома компенсационного типа (второе жилище);*
3. *Дома альтернативного типа.*

**1. Сельские дома.**

Характерная особенность предшествующего и в значительной мере современного развития жилищного строительства на селе – возведение традиционного крестьянского жилища, сохранившего черты народного зодчества прошлого. В сельском строительстве повторяются издавна сложившиеся планировочные, строительные и архитектурно-художественные приемы возведения сельских домов. Для практики сельского индивидуального строительства, как в прошлом, так и в настоящий период, характерно многообразие планировочной структуры сельского дома, отдельных элементов и деталей в зависимости от бытового уклада и местных особенностей. Народные мастера умело приспособливают жилище к местным условиям, искусно вписывают его в окружающую среду. При этом крыльцо, свесы и скаты кровель, оконные проемы, галереи и многие другие элементы выполняют функциональную роль и одновременно служат образной основой художественной характеристики сельского жилого дома [1, 5, 6, 7].

***Сельские жилые дома представлены разновидностями:***

- Сельская усадьба;
- Фермерская усадьба;
- Казачий курень;

***Первая разновидность – сельская усадьба.*** В сельских районах юга России возведены и строятся в настоящее время индивидуальные жилые дома усадебного типа – сельская усадьба. Индивидуальные дома многоквартирные – дом на одну семью, блокированные – двухквартирные (или так называемые спаренные) и многоквартирные (см. рис. 1).

Сельское индивидуальное жилище формировалось на протяжении многих веков в зависимости от национальных особенностей, социально-бытовых и природно-климатических условий. Дом на одну семью с земельным участком и дворовыми постройками для сельской местности в прошлом всегда был единственным типом жилища, обеспечивающим удобство ведения сельского хозяйства, изолированность, возможность организации подсобных поме-



щений и многочисленных хозяйственных построек. В настоящее время дом на одну семью относится к числу основных типов сельского индивидуального жилища и наиболее полно соответствует условиям жизни сельского населения.

Одноквартирный сельский жилой дом, предназначенный для одной семьи, в наибольшей мере соответствует специфическим условиям сельского образа жизни, наиболее полно и органично обеспечивает связь человека и с окружающей средой, с приусадебным участком, и с расположенными на нем хозяйственными и подсобными постройками. Такой дом исторически тесно связан с традиционной крестьянской избой и унаследовал от нее целый ряд принципиальных объемно-планировочных, конструктивных и архитектурно-художественных решений.

К преимуществам одноквартирного жилого дома относят его хорошую изолированность, простоту планировки и конструктивных решений, возможность полноценного формирования системы функциональных связей внутри жилища и в пределах придомового земельного участка. Кроме того, одноквартирный дом легче, чем какой-либо другой, таким образом разместить на приусадебном участке, чтобы обеспечивались наилучшие условия для естественного освещения жилых помещений, удобно и компактно были организованы хозяйственный двор и комплекс служебных сооружений. Он удобен еще и тем, что позволяет достаточно свободно трансформировать в случае необходимости его архитектурно-планировочную структуру и внешний облик: изменять назначение и размеры отдельных помещений путем перестановки внутренних перегородок, пристройки и достройки недостающих помещений, поэтапного, постепенного увеличения жилой площади и объема дома, то есть полноценного и последовательного использования традиционного принципа народного жилого зодчества — принципа *«растущего»* дома [6, 7].

Применение одноквартирных усадебных домов способствует разнообразной и выразительной архитектурно-пространственной организации отдельных жилых групп и их комплексов, помогает создать действительно индивидуальный и запоминающийся художественный облик современного села. Органично вписанный в природный ландшафт одноквартирный жилой дом как бы *«открывается»* в природу, тем самым выявляя и подчеркивая одно из основополагающих свойств пространства — его непрерывность.

Приусадебный земельный участок становится при этом своеобразной дополнительной *«зеленой комнатой»*, куда в летнее время может быть перенесена часть бытовых и хозяйственных процессов из пределов жилого дома. Веранды, крытые и открытые террасы, площадки для отдыха, организуемые на стыке жилища и естественной природной среды, смягчают контрастный переход из стен дома во внешнее пространство [7].

По своим функциональным и пространственным характеристикам одноквартирный дом очень удобен для индивидуальных застройщиков. Он предоставляет разнообразные возможности и для организации приусадебного подсобного хозяйства, и для формирования собственно жилища, его архитектурно-художественного и планировочного решения, создания всего усадебного комплекса в полном соответствии с потребностями и вкусами сельского населения и специфическими особенностями конкретного места строительства, каждого земельного участка.

Однако такой дом обладает и рядом недостатков по сравнению с сельскими домами других типов. Так, он менее экономичен в эксплуатации, поскольку имеет относительно большую площадь поверхности наружных стен, что требует существенных дополнительных затрат на отопление в зимний период по сравнению, например, с блокированными домами, где площадь наружных стен каждой из квартир значительно сокращена благодаря примыканию к другим квартирам дома.

При создании одноквартирного дома следует добиваться максимально возможной при каждом конкретном архитектурно-планировочном решении компактности планировки и объема жилища, что, как правило, улучшает и его функциональную организацию, поскольку позволяет сократить связи внутри дома. Кроме того, компактное решение жилого дома часто способствует и совершенствованию его архитектурно-художественного облика, так как формирует целостную архитектурно-пространственную композицию.

Одноквартирные дома по числу комнат делят на двух-, трех-, четырех-, пяти- и шестикомнатные, а по объемно-планировочному решению — на дома с квартирой в одном или в разных

уровнях – одноэтажные, с квартирой, расположенной в двух уровнях – двухэтажные, а также мансардные – с использованием в качестве второго этажа свободного чердачного пространства. Это возможно, однако, лишь при наличии скатной крыши с достаточно крутым уклоном.

Одноэтажный многоквартирный сельский дом усадебного типа наиболее удобен в архитектурно-планировочном отношении – в обеспечении хороших и надежных функциональных связей между отдельными помещениями и зонами внутри жилого пространства. Все его помещения могут быть органично и удобно расположены и ориентированы по сторонам горизонта, полноценно освещены естественным светом, что весьма важно для организации физиологически и психологически комфортного жилого пространства. Однако такой дом занимает значительную площадь на земельном участке, а это налагает определенные ограничения на формирование его архитектурно-планировочной структуры, на число жилых и подсобных помещений и на их размеры [5, 6, 7].

Например. Признано целесообразным возводить одноэтажные многоквартирные дома с жилой площадью не более 60 м<sup>2</sup> с квартирами в две, три или четыре комнаты, реже – в пять комнат.

Обычно в одноэтажном многоквартирном жилом доме устраивают два входа: главный – со стороны улицы и хозяйственный, со стороны двора, соединяющий хозяйственную часть дома с приусадебным участком и расположенными на нем подсобными и служебными постройками [5].

**Вторая разновидность – фермерская усадьба.** Планировочная структура сельского населенного пункта предопределяет пространственное сочетание основных функций (жилище – производство – обслуживание) с учетом многообразных и устойчивых внешних связей. На территории сельского населенного пункта, как правило, выделяются две разновидности или схемы: селитебная и производственная.

1) Селитебная схема – компактное размещение жилой и производственной зон в едином комплексе на расстоянии нормативного санитарного разрыва между ними;

2) Производственная схема – рассредоточенное размещение производственной зоны на нескольких участках.

Первая схема характерна для сельских хозяйств, возникших в 70-80-х годах 20 века на свободных территориях. При многих экономических преимуществах, являющихся следствием компактности размещения [8, 10].

В основе многовековой строительной культуры юга России (Северного Кавказа) заложено уважение народных традиций. Фермерская усадьба является многофункциональным архитектурно-ландшафтным объектом, в котором гармонично сочетаются жилищно-производственные функции. Сложившимся системам расселения соответствуют приемы размещения этих объектов: 1) в равнинных (степных) районах – линейно-гнездовое, линейно-рядовое; 2) в лесных – хуторское; 3) в горных – групповое в структуре поселка. При всем разнообразии архитектура фермерских хозяйств основывается на традиционных приемах.

По функционально-планировочному и объемно-пространственному решению выделены три основных типа жилищно-производственных комплексов фермерских усадеб: закрытый тип комплекса зданий и построек; ограниченно-закрытый тип; открытый тип жилищно-производственного комплекса. В процессе эволюции сложились их региональные типологические схемы жилых домов на юге России: двойные, тройные и комбинированные дома, различающиеся по конструктивному решению, по приемам блокирования и архитектурно-планировочной организации, учитывающие структуру повседневной хозяйственной и бытовой жизни сельских жителей.

Исследования функционально-планировочной структуры фермерской усадьбы позволили предложить классификацию по основным признакам: отраслевая принадлежность; пути реализации готовой продукции; уровень специализации; объем производимой продукции; размер территории; количество работающих; способ образования усадьбы; градостроительный прием размещения; архитектурно-планировочная организация фермерской усадьбы.

**Третья разновидность – казачий курень.** Курень – казачье жилище, изба, дом. Казачий курень бывает, как правило, двух видов: типа украинской хаты и двухэтажного типа

(называется также *«полукаменный»*) [9]. Хата, у украинцев, белорусов и части русских жилое помещение с печью, жилая постройка [4, с.1308]. Современный курень – двухэтажный, *«полукаменный»*. Первый этаж – кирпичный (прежде – саманный, из кирпича – сырца), второй – деревянный.

Первый этаж, как правило, не жилой, хозяйственный – называется *«низы»*. Считалось, что *«жить нужно в дереве, а припасы хранить в камне»*. Центром низов является, так называемая, *«холодная»* комната: без окон, но с небольшими отверстиями в стене, они устроенные особым образом, позволяющие так ходить воздуху, что в ней постоянно дул сквознячок, остывший в окружающих эту комнату каморах. Каморы, окаймляют *«холодную»* узким коридором. Входом во внутрь служит узкая и низкая дверь, которая обычно открывается внутрь низов (чтобы легко можно было ее подпереть). Такая низкая дверь, позволяющая войти только по одному, согнувшись под низкой притолокой (в прошлом, за дверью могла быть устроена яма для незваных гостей).

Главный вход в курень – по крыльцу (*«порожкам»*) устроен на второй этаж, окруженный особой террасой (*«балясами»*). Главная комната (*«зало»*), отгорожена от входной двери сенями. Курень в плане – это квадратный дом, обычно трехкомнатный, включающий в свой объем галерею, расположенную вдоль боковой части западной стены. Назначение галереи – защита от перегрева, резких ветров, а также увеличение площади дома. Она бывает как открытой, так и закрытой – остекленной или решетчатой, и выходит на главный фасад украшенным резьбой торцом, выступающим за плоскость стены на 1,5-2 м. иногда это крыльцо с выходом наружу, иногда просто балкончик, называемый по местному беседкой. Второй, хозяйственный вход располагается чаще всего посередине противоположной стороны галереи. Под галереей и кухней помещается погреб, откуда устроен лаз с откидной крышкой [9].

Особенностью куреня является идущий вдоль стен узкий помост-балкончик шириной около 70 см. иногда не огражденный, очень удобный для закрытия ставен, для отдыха и наблюдения, для других хозяйственных нужд. Именно он придает куреню неповторимый вид. Этот помост-балкончик опирается на столбики или цоколь, обычно ярко окрашенный. Вообще курени, строившиеся из дерева и местного камня, отличаются ярко-синей или зеленой окраской, живописной отделкой. Кровля четырехскатная, крыльцо опирается на столбики, покрыто двускатной или бочкообразной кровлей на тонких, затейливо украшенных колонках. Резные узоры на наличниках, ставнях и карнизе дают куреню особую привлекательность.

Большое значение имеет приусадебный участок с хозяйственными постройками, вытянутый в глубину и отгороженный забором от улицы, куда он выходит палисадником-цветником. При теплом продолжительном лете большое значение в хозяйственной жизни семьи имеют летние помещения – навес, летняя кухня, летняя столовая (под навесом или в тени раскидистых деревьев). В усадьбу входят: базы (хозяйственный двор с сараями для содержания домашних животных, птицы, кормов, инвентаря), уборная и компостная яма, а также навозная площадка. Огород и сад – украшение приусадебного участка, состоящий из яблонь, груш, слив, абрикосов, вишен и черешен.

## 2. Дома компенсационного типа (второе жилище).

В настоящее время экологические проблемы города стали глобальными. Город разрушает не только природные экосистемы, но и здоровье горожан. А с другой стороны, дефицит городских территорий и необходимость решения жилищной проблемы в городах заставляют обращать внимание на освоение загородных территорий. Проходящий сейчас процесс создания загородных ландшафтов, промежуточных между городскими – с высокоплотной многоэтажной застройкой и сельскими – с редкими поселениями без инженерной качественной и не развитой социальной инфраструктурами. Он начинает формировать новые системы поселений и типы домов, как в архитектурном, так и социальном плане.

Данная форма жилища соответствует требованиям постиндустриальной эпохи. Анализируя современные тенденции в области строительства жилья, ряд исследователей делает вывод, что жилище этой эпохи – односемейный жилой дом с зеленым участком и развитой инфраструктурой. Такое жилище должно обеспечивать экологичность жизни и среды обитания людей.

Люди хотят иметь загородные участки не только для аграрных работ и получения продукции со своих участков, а также для комфортного отдыха и проживания за городом, для которого, соответственно, нужен дом на участке. Большинство горожан стремится использовать участок для выращивания цветов, тихого отдыха, а так же для игр детей на свежем воздухе.

Анализ явления развития загородного жилища среди городских семей, проживающих в домах усадебного типа, показывает, что при размере городской усадьбы менее 400-500 кв. м, высокой доле ее застройки наблюдается развитие явления двойственности жилища. При этом даже самые не стесненные условия проживания семьи, не снижают потребности семьи в загородном жилище.

Термин *«второе жилище»* (или *«второй дом»*) обычно именуют в нашей стране дачные и садовые дома, жилище горожан в деревне. Термин подчеркивает отличие *«второго»* жилища от *«первого»*, то есть основного места проживания семьи – городской квартиры или индивидуального городского особняка и сосредотачивает внимание на двойственности жилой среды. Двойственность жилой среды – явление, когда семья имеет не одно место проживания, а два и даже более. Второе жилище, как правило, временное по использованию и специализированное по назначению: предназначено для проживания в течение определенного сезона, в период отпуска или выходные дни [12, 13].

На потребность горожанами в загородном жилище влияют многие факторы, такие, например, как характер основной работы в городе. В наибольшей мере нуждаются в таком виде жилища люди с такими характеристиками профессионального труда, которые связаны с нервными напряжениями, шумом, неподвижной сидячей работой. Из этого следует вывод, что такое жилище важно для горожан, которые испытывают большие психологические нагрузки наиболее вредные воздействия рабочей среды. В этом случае загородное жилище максимально выполняет свою компенсационную функцию. Семьи можно различать с низким, средним и высоким уровнем достатка. Уровень достатка в семье влияет на способ функционального освоения земельного участка, его инженерное оснащение, архитектуру загородного дома. Дом и участок могут различаться инженерным оснащением и техническим обеспечением – от низкого уровня до высокого, с установкой современного и дорогостоящего оборудования [15].

Второе жилище – это не *«стык города и деревни»* и не городская жизнь *«на сельский лад»*, акцент здесь иной. Второе жилище – это фрагмент городской среды, транслированной в сельскую округу, где соединены ценности городской и сельской жизни [12, 13].

*Дома компенсационного типа (второе жилище) представлены разновидностями:*

- Садовый домик;
- Дача;
- Коттедж;
- Вилла.

*Первая разновидность – садовый домик.* Садовые домики – небольшие, одноэтажные жилые строения, которые в основном возводят на малом участке где-то 600 кв. м. Владельцами таких садовых домиков является основная масса горожан. Используются участки в садоводческих товариществах или кооперативах в основном для занятия аграрным трудом или для отдыха. Главная причина распространения садоводческих участков считается затруднительное положение горожан с продовольствием, в частности со свежими фруктами и овощами. Садовые участки как сад и огород. Садовые дачные участки рассматриваются в этом случае как частная семейная ферма по снабжению семьи продовольствием.

По образному выражению академика В.И. Эдельштейна (ученый-овощевод), овощи и фрукты – *«музыка питания»*. Садоводы-любители практически доказали, что при средней урожайности садовый участок размером в 100 кв. м. способен обеспечить одного человека фруктами и ягодами в течение года, для семьи в пять-шесть человек надо иметь участок в 500-600 кв. м. [16].

Земля, выделяемая гражданам в личное пользование, имеет прямое назначение – выращивать овощи и фрукты для удовлетворения собственных потребностей. Автор приводит примерный план и вид приусадебного участка (рис. 2, 3).



Рисунок 2 – Вид приусадебного участка с улицы

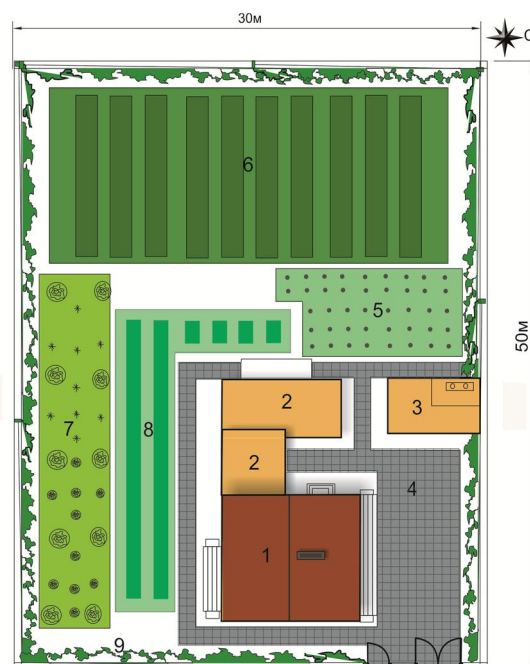


Рисунок 3 – Примерный план приусадебного участка: 1 – жилой дом; 2 – дворовые строения; 3 – крытый навес; 4 – двор; 5 – грядки с малиной; 6 – огород; 7 – фруктовый сад; 8 – грядки с клубникой; 9 – кустарник (живая изгородь)

Садовые поселки – это двойственность городского жилища в основном для масс трудящихся, малоимущих граждан. Жилище компенсационного типа. Доступность таких участков – общественный транспорт: автомобильный или железнодорожный.

Следует особо подчеркнуть, что садовые и дачные домики, пусть самые массовые типы вторых жилищ, но далеко не единственные. В последнее время распространение также получила еще одна разновидность вторых жилищ – мобильные (перемещаемые) дома горожан, которые вполне справедливо назвать «мигрирующими дачами» [12].

**Вторая разновидность – дача.** Дача – это загородный летний жилой дом, предназначенный для временного проживания городской семьи. Сюда перенесены отдельные фрагменты профессиональной деятельности одного из членов семьи, его хобби, то есть труд и отдых.

Слово «дача» имеет праславянское происхождение и берет начало от слова «дать». Дача – первоначально «дарованная князем земля» (Укр. «дача» – «принесение в дар»), этим словом именовались дарованные земельные наделы [12, 13].

Именно то обстоятельство, что дача – это, прежде всего свой Дом, своя собственность, подвигает людей к ее приобретению и строительству. То есть мотив средообразования, создания своего домашнего очага. Дачный дом и участок являются полем собственной, самостийной средовой активности семьи, «причем существует у людей не в актуализированном виде, а как ни чем неистребимый инстинкт средообразования, неосознанный ими самими» [13].

Дачные поселки – это продолжение двойственности городского жилища, но для среднего класса граждан, это жилище компенсационного типа. Для деятелей культуры, то есть творческой интеллигенции, управленцев, крупные чиновников – нужных государству людей.

**Третья разновидность – коттедж.** Коттедж (англ. cottage) – это комфортабельный односемейный индивидуальный городской или сельский жилой дом, который располагается на участке земли средней величины (2000-4000 кв. м.), имеет обычно два этажа. Коттедж – традиционный тип английского жилища, распространившийся в европейских странах и США [4, с. 582]. Коттеджные поселки – загородное поселение. Современные коттеджные поселки содержат насыщенную инфраструктуру, удовлетворяющую все нужды проживающих в них жителей. Это тот же дачный поселок, но более современный. Здесь уже расположен средний класс – капиталистический: предприниматели, бизнесмены, деятели культуры (они называют

себя элитой). Такие поселки – частная инициатива. Это сложное, многовариантное явление, может отражать двойственность городского жилища (если имеется в городе квартира как основное жилье, ищут хорошую экологию и здоровье).

**Четвертая разновидность – вилла.** Вилла (лат. Villa – усадьба, поместье) – это комфортабельный индивидуальный частный дом для одной семьи в парке с декоративным садом [4, с.203]. Этот дом располагается в привилегированных районах города, пригорода, загорода, в курортной зоне. Вилла сегодня, при первом же взгляде обнаруживает лишь символическую связь с виллой в устоявшемся понимании (как семейным имением с парком или садом с комфортабельным домом и привилегированным расположением). Благодаря преемственности с виллой от античности до наших дней, в самой природе «городской виллы» заложена потенциальная возможность формирования высоко комфортных жилищных условий [3, 12].

Это жилище компенсационного типа, так как должно обеспечить максимальный контакт аристократа-горожанина (в данном случае богатого) с природой, появляется двойственность или раздвоенность городского жилища.

Идеальная модель виллы выявлена в ходе историко-генетического анализа ее вневременных свойств – 1) жилое назначение в первую очередь; 2) индивидуализация; 3) тесная связь с природным окружением; 4) приватность; 5) высокий уровень комфорта. Стремление к этому идеалу прослеживается на протяжении всей истории возведения виллы [3].

### 3. Дома альтернативного типа.

Экологические поселения, в которых человеческая жизнь интегрирована в природную среду, поддерживает здоровое развитие человека и причиняет наименьший вред природе. Не меньшей ценностью являются культурные, коллективистские, возрождения здорового образа жизни и человека в самом широком смысле. Неудовлетворенность постиндустриальным городом положила начало формированию жилища нового типа – экодому, как новейшей формы исхода горожан в природу. Для максимального самовоспроизводства природной среды участки большой величины, примерно 1 га. Горожанин по преимуществу бедный. Жилище дает альтернативные формы жизни и архитектуры [13].

**Экодом.** В идеале это абсолютно самостоятельное автономное строение со своим водоснабжением, позволяющее не только организовать полную переработку и утилизацию бытовых отходов, но и не наносящие ущерба экологии окружающей среды. Следуя существующим концепциям, экодом строится из возобновляемых, экологически чистых материалов, обеспечивающих эффективную теплоизоляцию и в то же время естественный воздухообмен и вентиляцию, чтобы ни одна частичка тепла не пропала даром, экодом полностью герметичен (воздухонепроницаем). Для обеспечения экодому свежим воздухом используются специальные системы вентилирования, взаимнообменивающие комнатный и наружный воздух. При таком контролируемом процессе тепло не теряется. Нагрев воды и дополнительного отопления в холодные дни происходит благодаря системам рекуперации тепла и отопления с помощью природной энергии (посредством тепловых насосов и солнечных коллекторов).

В здании используется только экологическое инженерное оборудование при получении и преобразовании энергии, а также при утилизации отходов. Применяются технологические и природные фильтры для очистки питьевой и технической воды. Утилизация отходов осуществляется по структуре материала, проходит вторичное использование.

Водоснабжение экодому – серьезная, но более доступная задача. В данном случае используются атмосферные осадки, постоянно сопутствующий и не всегда заметный конденсат, очищенные бытовые стоки, в определенной степени артезианские источники, и другие имеющиеся доступные технические возможности для стабильного водоснабжения.

Главной проблемой экодому остается автономное энергоснабжение и энергосбережение. Методы решения их, с одной стороны, как будто лежат на поверхности. Это успешно применяемые сейчас солнечные батареи и ветрогенераторы. Тем не менее, мощность таких устройств остается недостаточной. В южных районах, где уровень суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность выше, чем в других районах, рекомендуется устраивать теплицы с южной стороны фасада, все остальные помещения направлять также на юг. Для большего энергосбережения, форма здания должна быть приближена к кубу [11].

Основные принципы формирования экологичности экодому определяются микроклиматом помещений, средой обитания, формообразованием и планировочными решениями экодому, учитывающими особенности окружающей среды, энергосберегающими объемно-пространственными решениями, позволяющими вписать автономное жилое здание в существующий ландшафт и как конечная цель – создание экологического баланса «человек-природа».

### Заключение

Комплексный анализ сложившейся ситуации на юге России, прежде всего районов Ставропольского края, показал, что основными предпосылками для формирования загородного малоэтажного жилищного строительства являются:

- выбор под застройку новых земельных участков, требующих минимальных затрат на их планировку и инженерное обустройство;
- использование существующего регионального потенциала полносборного домостроения для возведения малоэтажных жилых домов, преимущественно для загородного жилья;
- выбор типов и видов жилья, конструктивных и технологических схем быстровозводимых зданий и построек, в наибольшей степени удовлетворяющих местным условиям и социальной норме площади жилья для конкретного состава семьи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архитектурные детали сельских жилых домов усадебного типа: Альбом [Текст] / сост. Х.А. Бутусов, Ю.А. Новоселов. – М.: Россельхозиздат, 1983. – 160 с.
2. Асаул, А. Н. Теория и практика малоэтажного жилищного строительства в России [Текст] / А.Н. Асаул, Ю.Н. Казаков, Н.И. Пасяда, И.В. Денисов; под ред. д-р э. н., проф. А.Н. Асаула. – СПб.: Гуманистика, 2005. – 563 с.
3. Березин, Д.В. Архитектура «городской виллы» как направление развития элитарного жилища [Текст]: дис. ... канд. архитектуры: 18.00.01 / Березин Дмитрий Владимирович. – Екатеринбург, 2006. – 145 с.
4. Большой энциклопедический словарь [Текст]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Большая Российская энциклопедия»; СПб.: Норинт, 2002. – 1456 с.
5. Бударин, Е.Л. Архитектурно-планировочные особенности индивидуального жилого дома в Ставропольском крае [Текст] / Е.Л. Бударин // Фэн-наука. Периодический журнал научных трудов. – 2012. – №6 (9). – С. 8-10.
6. Бударин, Е.Л. Архитектурно-планировочная организация и этапы развития индивидуального жилища на Ставрополье [Текст] / Е.Л. Бударин // Монтажные и специальные работы в строительстве. Ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – 2012. – №9 (845). – С. 10-14.
7. Бударин, Е.Л. Архитектурный облик индивидуального жилищного строительства в городе (на примере Ставрополя) [Текст] / Е.Л. Бударин // Монтажные и специальные работы в строительстве. Ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – 2013. – №1 (849). – С. 20-24.
8. Гераскин, Н.Н. Планировка и застройка фермерских усадеб [Текст] / Н.Н. Гераскин. – М.: Колос, 2006. – 288 с.
9. Кобычев, В.П. Поселение и жилище народов Северного Кавказа в XIX–XX вв. [Текст] / В.П. Кобычев. – М.: Наука, 1982. – 196 с.
10. Новиков В.А. Архитектурная организация сельской среды: учеб. пособие [Текст] / В.А. Новиков. – М.: Архитектура, 2006. – 376 с.
11. Погонин, А.О. Принципы формирования автономных жилых зданий в экстремальных условиях природного характера [Текст]: автореф. дис. ... канд. Архитектуры: 05.23.21 / Погонин Алексей Олегович. – М., 2010. – 31 с.
12. Поморов, С.Б. Второе жилище горожан или дом на природе. Урбоэкологические аспекты эволюции городского жилища: Научная монография [Текст] / С.Б. Поморов. – Новосибирск: изд-во НГАСХА, 2004. – 472 с.
13. Поморов, С.Б. Второе жилище горожан компенсационного типа [Текст]: дис. ... д-ра архитектуры: 18.00.02 / Поморов Сергей Борисович. – М., 2005. – 339 с.
14. Уварова, С.В. Современные тенденции формирования загородного жилища [Текст]. [Электронный ресурс] / С.В. Уварова, В.М. Молчанов. – URL: <http://archcon.ru/tipi-zagorodnogo-zhilja.php>.
15. Уварова С. В. Формирование альтернативной среды для жизни горожан [Текст]. [Электронный ресурс] / С.В. Уварова, В.М. Молчанов. – URL: <http://archcon.ru/tipi-zagorodnogo-zhilja.php>.
16. Яцына, А. С. Приусадебный сад-огород: Продовольственная программа в действии [Текст] / А.С. Яцына, И.Н. Камаев, А.В. Кирпиченко. – Ставрополь: Кн. изд-во, 1984. – 303 с.

**Бударин Евгений Леонидович**

Северо-Кавказский федеральный университет, Гуманитарный институт, г. Ставрополь

Доцент кафедры «Дизайн»

E-mail: budarin\_@mail.ru

E.L. BUDARIN

## ARCHITECTURE OF COUNTRY HOUSES, THEIR TYPES AND DEVELOPMENT IN SOUTHERN RUSSIA

*Types, versions and classification of individual country dwelling, its development in the south part of Russia are considered. The system of the country dwelling formation on three types is offered: 1) rural houses; 2) compensation type houses (the second dwelling); 3) alternative type houses. Each type shares on a versions. Analysis of the current situation in the south of Russia, first of all in regions of Stavropol Territory, showed that preconditions for formation of country low housing construction are a choice of housing types, constructive and technological schemes of fast-erected buildings and constructions which are satisfy in a the greatest degree local conditions and social norm of the housing area for the concrete structure of family.*

**Keywords:** Individual country dwelling, rural houses, compensation type houses, alternative type houses, constructive and technological schemes of buildings, cossack hut.

### BIBLIOGRAPHY

1. Arhitekturnye detali sel'skih zhilyh domov usadbnogo tipa: Al'bom [Tekst] / sost. H.A. Butusov, Ju.A. Novoselov. – M.: Rossel'hozizdat, 1983. – 160 s.
2. Asaul, A. N. Teorija i praktika malojetazhnogo zhilishhnogo stroitel'stva v Rossii [Tekst] / A.N. Asaul, Ju.N. Kazakov, N.I. Pasjada, I.V. Denisov; pod red. d-r je. n., prof. A.N. Asaula. – SPb.: Gumanistika, 2005. – 563 s.
3. Berezin, D.V. Arhitektura «gorodskoj villy» kak napravlenie razvitija jelitarnogo zhilishha [Tekst]: dis. ... kand. arhitektury: 18.00.01 / Berezin Dmitrij Vladimirovich. – Ekaterinburg, 2006. – 145 s.
4. Bol'shoj jenciklopedicheskij slovar' [Tekst]. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: «Bol'shaja Rossijskaja jenciklopedija»; SPb.: Norint, 2002. – 1456 s.
5. Budarin, E.L. Arhitekturno-planirovochnye osobennosti individual'nogo zhilogo doma v Stavropol'skom krae [Tekst] / E.L. Budarin // Fjen-nauka. Periodicheskij zhurnal nauchnyh trudov. – 2012. – №6 (9). – S. 8-10.
6. Budarin, E.L. Arhitekturno-planirovochnaja organizacija i jetapy razvitija individual'nogo zhilishha na Stavropol'e [Tekst] / E.L. Budarin // Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve. Ezheimesjachnyj nauchno-tehnicheskij i proizvodstvennyj zhurnal. – 2012. – №9 (845). – S. 10-14.
7. Budarin, E.L. Arhitekturnyj oblik individual'nogo zhilishhnogo stroitel'stva v gorode (na primere Stavropolja) [Tekst] / E.L. Budarin // Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve. Ezheimesjachnyj nauchno-tehnicheskij i proizvodstvennyj zhurnal. – 2013. – №1 (849). – S. 20-24.
8. Geraskin, N.N. Planirovka i zastrojka fermerskih usadeb [Tekst] / N.N. Geraskin. – M.: Kolos, 2006. – 288 s.
9. Kobychiev, V.P. Poselenie i zhilishhe narodov Severnogo Kavkaza v XIX–XX vv. [Tekst] / V.P. Kobychiev. – M.: Nauka, 1982. – 196 s.
10. Novikov V.A. Arhitekturnaja organizacija sel'skoj sredy: ucheb. posobie [Tekst] / V.A. Novikov. – M.: Arhitektura, 2006. – 376 s.
11. Pogonin, A.O. Principy formirovanija avtonomnyh zhilyh zdaniy v jekstremal'nyh uslovijah prirodnoho haraktera [Tekst]: avtoref. dis. ... kand. Arhitektury: 05.23.21 / Pogonin Aleksej Olegovich. – M., 2010. – 31 s.
12. Pomorov, S.B. Vtoroe zhilishhe gorozhan ili dom na prirode. Urbojekologicheskie aspekty jevoljucii gorodskogo zhilishha: Nauchnaja monografija [Tekst] / S.B. Pomorov. – Novosibirsk: izd-vo NGAHA, 2004. – 472 s.
13. Pomorov, S.B. Vtoroe zhilishhe gorozhan kompensacionnogo tipa [Tekst]: dis. ... d-ra arhitektury: 18.00.02 / Pomorov Sergej Borisovich. – M., 2005. – 339 s.
14. Uvarova, S.V. Sovremennye tendencii formirovanija zagorodnogo zhilishha [Tekst]. [Jelektronnyj resurs] / S.V. Uvarova, V.M. Molchanov. – URL: [http:// archcon.ru/tipi-zagorodnogo-zhilja.php](http://archcon.ru/tipi-zagorodnogo-zhilja.php).
15. Uvarova S. V. Formirovanie al'ternativnoj sredy dlja zhizni gorozhan [Tekst]. [Jelektronnyj re-surs] / S.V. Uvarova, V.M. Molchanov. – URL: <http://archcon.ru/tipi-zagorodnogo-zhilja.php>.
16. Jacyna, A. S. Priusadebnyj sad-ogorod: Prodovol'stvennaja programma v dejstvii [Tekst] / A.S. Jacyna, I.N. Kamaev, A.V. Kirpichenko. – Stavropol': Kn. izd-vo, 1984. – 303 s.

**Budarin Evgeny Leonidovich**

North Caucasus federal university, Humanitarian institute, Stavropol

Associate professor of department «Design»

E-mail: budarin\_@mail.ru



КОБЕЛЕВА С.А.

## ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЯХ К ОБЪЕКТАМ НЕДВИЖИМОСТИ

*В России вступает в силу государственный стандарт, который содержит экологические требования к объектам недвижимости. Экологические требования к объектам недвижимости определены совокупностью следующих базовых категорий: экологический менеджмент; качество архитектуры и планировка объекта; энергосбережение и энергоэффективность; охрана окружающей среды при строительстве, эксплуатации и утилизации объекта; безопасность жизнедеятельности и др. В статье приведены примеры ресурсосберегающих строительных технологий. Для технико-экологической оценки проектных решений целесообразно применять частные и суммарные показатели безотходности, которые измеряют степени использования различных видов ресурсов.*

**Ключевые слова:** экологические требования, недвижимость, показатели безотходности.

Во всем мире в последние десятилетия увеличился спрос на «зеленые» жилые, административные здания, промышленные объекты и технологии. В строительном комплексе появилась потребность в определении четких критериев, своеобразных ориентиров экологической безопасности, энерго- и ресурсоэффективности строительной продукции. В Российской Федерации с 01.03.2013 вступает в силу ГОСТ Р 54964-2012 «Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости», основные положения которого разработаны Министерством природных ресурсов и экологии [1]. Государственный стандарт содержит экологические требования, предъявляемые к объектам недвижимости, такие как: использование экологически чистых сертифицированных строительных материалов; повторное применение техногенных строительных отходов; требования обеспечения экологической безопасности при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий в течение всего жизненного цикла и др. Кроме того, применение в проектах энерго- и ресурсоэффективных строительных технологий включает в себя и социальную составляющую: стоимость приобретения объекта недвижимости и стоимость его эксплуатации.

В основу государственного стандарта положен «принцип устойчивого развития общества» [1, п. 4.1], который заключается в том, что «при осуществлении градостроительной деятельности обеспечиваются безопасность и благоприятные условия жизнедеятельности человека, ограничивается негативное воздействие хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду и обеспечивается охрана и рациональное использование природных ресурсов в интересах настоящего и будущего поколений». Экологические требования к объектам недвижимости определены совокупностью следующих базовых категорий: экологический менеджмент; инфраструктура и качество внешней среды; качество архитектуры и планировка объекта; комфорт и экология внутренней среды; качество санитарной защиты и утилизации отходов; рациональное водопользование и регулирование ливнестоков; энергосбережение и энергоэффективность; охрана окружающей среды при строительстве, эксплуатации и утилизации объекта; безопасность жизнедеятельности.

Рациональное использование природно-сырьевых, топливно-энергетических ресурсов составляют основу природоохранной деятельности, в том числе и в строительной отрасли.

Например, эффективное использование ресурсов улучшает качество жизни – чувствовать себя комфортнее в безопасных зданиях. Отработанные ресурсы загрязняют воздух, воду, почву и т.п. Эффективность борется с отходами и, следовательно, уменьшает загрязнения, которые, в сущности, представляют собой направление ресурсов не по назначению. Эффективное использование ресурсов обычно приносит прибыль – сокращение энергии и сырья при производстве строительных материалов, изделий и конструкций, снижение издержек на эксплуатацию зданий.

По мнению ряда ученых термины «экология» и «экономика» близки друг другу как по содержанию, так и по смыслу. Так, Э. Геккель понимал под экологией систему знаний, отно-

сящихся к экономике природы. Деятельность человеческого общества связана с хозяйствованием (производством): чтобы что-то произвести, необходимо выполнить определенную работу, а это, в свою очередь, требует затрат энергии и веществ.

В строительной отрасли взаимосвязь экономических и экологических проблем можно проиллюстрировать рядом примеров. Трудности с добычей природно-сырьевых, топливно-энергетических ресурсов, связанные с увеличением глубины их залегания, а также постепенным сокращением разведанных и вовлеченных в экономический оборот объемов ведут к неизбежному повышению цен на сырье и росту сопутствующих затрат в смежных отраслях промышленности, что в итоге сказывается на стоимости и качестве строительных материалов, изделий, конструкций. Загрязнение окружающей среды отходами промышленного производства и потребления, строительным ломом, полученным от разборки зданий и др. приводят к уменьшению полезной площади земель, а также требуют огромных затрат на хранение, захоронение, утилизацию отходов и т.д. Таким образом, рост производства неизбежно ведет к увеличению загрязнения окружающей среды техногенными отходами, а необходимость соблюдения экологических нормативов может явиться существенным ограничением экономического, технологического развития строительной отрасли [2].

Развитие мало- и безотходных строительных технологий, когда отходы производства в преобразованном виде могут использоваться в виде вторичных энергетических и материальных ресурсов – один из путей решения одновременно экологических и экономических проблем в строительном комплексе. Положительное следствие этого – замедление темпов истощения первичных природных ресурсов и сокращение антропогенного загрязнения окружающей среды.

На всех стадиях жизненного цикла жилых зданий затрачивается определенное количество природно-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов. Компенсировать их можно только в процессе длительной эксплуатации ресурсоэффективных и экологически безопасных объектов. Поэтому выбор архитектурно-конструктивной системы жилого здания – один из важнейших факторов, оказывающих влияние, как на его сметную стоимость, так и на ресурсосбережение на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации.

Для оценки степени безотходности по отдельным видам природно-сырьевых или топливно-энергетических ресурсов, или их совокупности могут применяться соответственно частные или суммарные показатели безотходности, которые дают оценку степени использования различных ресурсов. При этом учитывается вся технологическая цепочка от добычи сырья или топлива до получения и использования технологических продуктов. Такой подход позволяет отразить народнохозяйственную значимость повышения степени использования природных ресурсов [3].

Частный технико-экологический показатель безотходности ( $B_1$ ) определяется по формуле (1):

$$B_1 = \sum V_{ij} / V_i, \quad (1)$$

где  $V_{ij}$  – объем полезно использованного  $i$ -того ресурса в  $j$  – технологическом продукте, изделии, процессе (руб., т, м<sup>3</sup> и др.);  $V_i$  – объем введенного в технологический продукт, изделие, процесс  $i$ -го ресурса (руб., т, м<sup>3</sup> и др.).

Суммарный технико-экологический показатель безотходности ( $B_2$ ) определяется по формуле (2):

$$B_2 = \sum V_j / \sum V_i, \quad (2)$$

где  $V_j$  – объем  $j$ -го технологического продукта, изделия, процесса (руб., т, куб. м и др.).

Численные значения показателей безотходности меньше единицы.

Оценку ресурсоэффективных конструктивных систем целесообразно производить путем сравнения с конкурирующим проектом, применяемым в настоящее время в практике строительства. Например, суммарный оценочный эффект ( $\Delta B$ ) рассчитывается по формуле (3):

$$\Delta B = B_{2k} - B_{2q}, \quad (3)$$

где  $B_{2k,q}$  – суммарный технико-экологический показатель безотходности соответственно по  $k$  – му и  $q$ -му вариантам сравниваемых конструктивных решений.

Например, при изготовлении всех сборных железобетонных элементов каркасного здания из высокопрочных бетонов классов по прочности В45-В50 взамен тяжелого бетона на плотных природных заполнителях масса здания снижается до 30%. Это позволяет сократить расход высокоэнергоемкой арматурной стали: в горизонтальных элементах на 10-15% (13-20 кг) на 1 м<sup>3</sup> железобетона; в колоннах – на 15-20% (85-110 кг) на 1 м<sup>3</sup> железобетона; в фундаментах – на 15-20% (15-35 кг) на 1 м<sup>3</sup> железобетона. Значительный резерв в снижении расходов ресурсов может быть реализован за счет совершенствования конструкций стыков элементов сборного каркаса. Помимо конструктивных систем зданий значительный эффект ресурсосбережения достигается при использовании альтернативных низкоэнергоемких строительных материалов. Так, применение в бетонах пористых заполнителей (продуктов переработки металлургических шлаков и топливной энергетики) позволяет при равных свойствах материалов снизить энергозатраты на их производство на 12-35%. При этом одновременно решаются вопросы утилизации отходов промышленного производства и охраны окружающей среды [4].

Основываясь на принципах инновационных биосферосовместимых технологий, ключевыми направлениями энергоэффективности и энергосбережения в строительной отрасли являются технологии с применением двухкомпонентного сырья (природного и техногенного). Применение техногенного сырья (отходов промышленного производства, строительного лома, получаемого от разборки конструкций зданий и пр.) способствует не только снижению использования ограниченных природных ресурсов, но и частичному решению проблемы утилизации отходов и сокращению площадей свалок, полигонов, а также экономии затрат на их утилизацию и др.

Так, в качестве техногенных отходов, пригодных для использования в качестве дополнительного сырья при производстве эффективных конструкционно-изоляционных материалов, могут применяться металлургические шлаки. Они характеризуются постоянным химическим составом, экологически безопасны и представляют собой классическую силикатную систему. Экспериментальные исследования показывают, что замена 15-20% глинистого материала на тонкомолотый доменный шлак не приводит к ухудшению свойств многих керамических материалов.

Другим примером использования техногенного сырья в комплексе с дефицитными минерально-сырьевыми ресурсами может служить применение боя стеклотарного сырья в производстве теплоизоляционных пеностеклокристаллических материалов. Его использование позволяет снизить энергоемкость технологического процесса производства изделий за счет более низкой температуры вспенивания синтезируемого материала (800÷850°C) по сравнению с применением «чистых» природных компонентов – кварцевого песка, перлита, у которых температура обработки варьируется в пределах 1400÷1550°C.

К сожалению, примеры использования двухкомпонентного сырья для производства строительных материалов в нашей стране носят лишь фрагментарный характер.

В том случае, если для производства строительных материалов с одинаковыми свойствами используется только «чистое» природное сырье, то необходимо соизмерять эффективность его применения со степенью ущерба, наносимого биосфере.

Например, высокопрочный трепельный гравий, получаемый путем обжига в печах специально подготовленных гранул из трепела, является прекрасным заполнителем в бетон и полностью заменяет гранитный щебень. При его использовании в качестве заполнителя возможно получение бетона класса В15-В25 и снижение массы 1 м<sup>3</sup> бетона на 150-200 кг без снижения прочностных свойств [5].

Кроме того, основными факторами, влияющими на ресурсосбережение при проектировании и строительстве зданий, являются следующие: рациональный выбор объемно-планировочных и конструктивных решений; длительность срок службы; снижение ресурсоемкости зданий и, как результат – снижение использования невозобновляемых природных ресурсов. В нашей стране имеются современные разработки (НИИСФ РААСН), подтвержден-

ные расчетами, по применению в наружных стенах теплотехнически эффективной несъемной опалубки взамен кладки из легкобетонных блоков, стен с системой скрепленной теплоизоляции и тонким штукатурным слоем, навесных фасадов, энергосберегающих окон и т.п.

Дальнейшее развитие конструктивных систем жилых зданий должно основываться на следующих базовых принципах:

- 1) обеспечение высоких показателей энергозащиты внешнего контура здания из экологически чистых легко утилизируемых материалов;
- 2) снижение материалоемкости несущего остова здания за счет применения облегченных тонкостенных несущих элементов и пространственной системы каркаса всего здания;
- 3) применение комбинированных решений внутренних несущих конструктивных элементов каркаса с высокими взрывопожаробезопасными, шумозащитными и другими свойствами, в том числе обеспечивающими высокий комфорт помещений здания;
- 4) применение в здании рециклируемых материалов и конструкций и высокими показателями энергоэффективности на всех этапах полного ресурсного цикла здания, включая и его утилизацию;
- 5) планирование на стадии проектирования и обеспечение высокого уровня ремонтно-пригодности и утилизируемости объекта (до 90-95%), а также повторного использования после переработки материалов в производстве новых изделий и конструкций.

Предлагаемый метод расчета технико-экологических показателей позволят на новой качественной основе выявить перспективные архитектурно-конструктивные решения жилых зданий, отвечающих экологическим требованиям.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 54964-2012 «Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости» [Электронный ресурс]: Портал Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации – Режим доступа: <http://www.mnr.gov.ru/greenstandarts>. Дата обращения – 22.02.2013.
2. Кобелева, С.А. Управление ресурсами биосферы при создании строительной продукции [Текст] / С.А. Кобелева // Безопасность в техносфере. – 2012. – №4. – С. 17-20.
3. Арбузов, В.В. Экономика природопользования и природоохраны [Текст]: учебное пособие / В.В. Арбузов, Д.П. Грузин, В.И. Симакин. Пенза: Пензенский государственный университет, 2004. – 251 с.
4. Ярмаковский, В.Н. О ресурсоэнергосбережении при использовании инновационных технологий в конструктивных системах зданий в процессе их создания и возведения [Текст] / В.Н. Ярмаковский, А.С. Семченков, М.М. Козелков, Д.А. Шевцов // Вестник МГСУ. – 2011. – №3. – том 1. – С. 209-214.
5. Ильичев, В.А. Об инновационных технологиях для ресурсо-энергоэффективного строительства [Текст] / В.А. Ильичев, В.И. Колчунов, С.А. Кобелева, С.В. Солопов // Биосферосовместимые города и поселения: материалы междунар. науч.-практ. конф. (11-13 дек. 2012 г., Брянск) / Брян. гос. инженер.-технол. акад. и др.; под общ. Ред. В.А. Ильичева, В.И. Колчунова – Брянск, 2012. – С. 29-35.

**Кобелева Светлана Анатольевна**

Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и материалы»  
E-mail: ksa92@ya.ru

---

S.A. KOBELEVA

## ABOUT ECOLOGICAL REQUIREMENTS TO REAL ESTATE OBJECTS

*In Russia the state standard which contains ecological requirements to real estate objects comes into force. Ecological requirements to real estate objects are defined by set of the following basic categories: ecological management; quality of architecture and object planning; energy saving and en-*

*ergy efficiency; environmental protection at construction, operation and object utilization; health and safety, etc. In article examples of resource-saving construction technologies are given. It is expedient to apply private and total indicators of wastelessness which measure extents of use of different types of resources to a technical and ecological assessment of design decisions.*

**Keywords:** *ecological requirements, real estate, wastelessness indicators.*

## BIBLIOGRAPHY

1. GOST R 54964-2012 «Ocenka sootvetstviya. Jekologicheskie trebovaniya k ob'ektam nedvizhimosti» [Elektronnyj resurs]: Portal Ministerstva prirodnih resursov i jekologii Rossijskoj Federacii – Rezhim dostupa: <http://www.mnr.gov.ru/greenstandarts>. Data obrashheniya – 22.02.2013.
2. Kobeleva, S.A. Upravlenie resursami biosfery pri sozdanii stroitel'noj produkcii [Tekst] / S.A. Kobeleva // Bezopasnost' v tehnosfere. – 2012. – №4. – S. 17-20.
3. Arbuzov, V.V. Jekonomika prirodopol'zovaniya i prirodohhrany [Tekst]: uchebnoe posobie / V.V. Arbuzov, D.P. Gruzin, V.I. Simakin. Penza: Penzenskij gosudarstvennyj universitet, 2004. – 251 s.
4. Jarmakovskij, V.N. O resursojenergoberezenii pri ispol'zovanii innovacionnyh tehnologij v konstruktivnyh sistemah zdaniy v processe ih sozdaniya i vozvedeniya [Tekst] / V.N. Jarmakovskij, A.S. Semchenkov, M.M. Kozelkov, D.A. Shevcov // Vestnik MGSU. – 2011. – №3. – tom 1. – S. 209-214.
5. Il'ichev, V.A. Ob innovacionnyh tehnologijah dlja resurso-jenergojeffektivnogo stroitel'stva [Tekst] / V.A. Il'ichev, V.I. Kolchunov, S.A. Kobeleva, S.V. Solopov // Biosferosovmestimye goroda i poselenija: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (11-13 dek. 2012 g., Brjansk) / Brjan. gos. inzhener.-tehnol. akad. i dr.; pod obshh. Red. V.A. Il'icheva, V.I. Kolchunova – Brjansk, 2012. – S. 29-35.

**Kobeleva Svetlana Anatolevna**

State university – educational-science-production complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department «Building constructions and materials»

E-mail: ksa92@ya.ru

УДК 625.7/.8:658.562

БАТРАКОВА А.Г.

### **ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В КОНСТРУКТИВНЫХ СЛОЯХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД**

*Разработаны модели, алгоритмы и программы автоматизированного расчета для позиционирования и идентификации подповерхностных дефектов в конструктивных слоях дорожных одежд. Представлены результаты лабораторных и полевых экспериментов по проверке адекватности разработанных моделей и алгоритмов.*

**Ключевые слова:** георадарные технологии, дорожная одежда, подповерхностные дефекты, параметры трещины, обследование автомобильных дорог.

Работоспособность дорожной одежды и ее остаточный ресурс зависят не только от проектной надежности, но и от выбора и проведения наиболее эффективных видов работ по содержанию и ремонту. Назначение оптимальных мероприятий возможно только при наличии полного набора данных о фактическом состоянии конструкции дорожной одежды в текущий момент. Вместе с тем, в настоящее время остается достаточное число показателей, не поддающихся оперативному учету и количественной оценке с помощью существующих средств. К ним в первую очередь относятся подповерхностные дефекты различных типов (расслоения, трещины в нижних слоях асфальтобетона, зоны переувлажнения и недоуплотнения в слоях из несвязных материалов и грунтах основания). Проблема оперативного автоматизированного позиционирования подповерхностных дефектов и их идентификации в слоях дорожных одежд к настоящему времени в мировой практике не решена.

В математическом плане задачи поиска подповерхностных дефектов сводятся к необходимости разработки математически корректной и эффективной с вычислительной точки зрения постановки задачи, алгоритмов и программ для анализа полей, рассеянных неоднородными объектами сложной формы, которые расположены в плоскостной среде.

В основу решения задачи поиска и идентификации подповерхностных дефектов в конструктивных слоях дорожной одежды положены как идеи регистрации кросс-поляризационного компонента сигнала, так и идеи обработки импульсных сигналов от стандартного антенного блока с дипольными антеннами типа «бабочка». Обработка радарограм, полученных в процессе проведения экспериментальных исследований, сводится к вычитанию двух взаимно ортогональных компонентов сигнала, что позволяет определить участки среды с анизотропными свойствами. В данном случае при обследовании дорожных одежд под изотропной понимается среда с одинаковыми электрофизическими характеристиками по всем направлениям и отсутствием дефектов (трещин, посторонних включений). Наличие трещин или посторонних включений нарушает симметрию среды, и она становится анизотропной. Тогда результирующий импульс, полученный вычитанием двух взаимно ортогональных поляризаций, при отсутствии дефектов будет иметь достаточно малую нормированную амплитуду, которая стремится к нулю, и может быть принят в качестве нормировочного или эталонного импульса. При наличии дефектов в нижнем слое покрытия характер импульса будет существенным образом отличаться от эталонного.

Проведение серии модельных экспериментов позволило подтвердить эффективность предложенного алгоритма обнаружения подповерхностных дефектов на малых глубинах или вблизи поверхности покрытия и разработать методику поиска и идентификации подповерх-

ностных дефектов. Под подповерхностными дефектами в данном случае будем понимать локальные нарушения целостности и однородности нижних слоев покрытия и слоев основания дорожной одежды, возникающие под влиянием транспортных нагрузок, природно-климатических факторов, а именно, трещины и пустоты в нижних слоях покрытия и укрепленных слоях основания.

Решение задачи дефектоскопии дорожных одежд с помощью технологий подповерхностного зондирования осуществляется в несколько этапов:

- получение исходной информации в виде массивов данных;
- первичная обработка исходной информации, полученной в процессе георадарного обследования дорожной одежды;
- решение задачи выявления, позиционирования и идентификации подповерхностных дефектов.

В качестве модели будем использовать плоскостойкую среду с дефектом (трещиной) в нижнем слое (рис. 1).

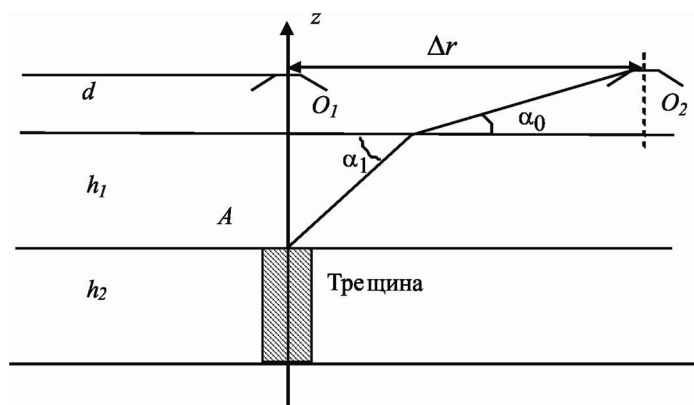


Рисунок 1 – Модель плоскостойкой среды

Предположим, что трещина находится в нижнем из двух слоев покрытия и имеет малую ширину, а глубину – на всю толщину слоя. Толщину верхнего слоя (она предполагается неизвестной) обозначим  $h_1$ , а его диэлектрическую проницаемость –  $\epsilon_1$ . Для второго слоя соответственно  $h_2$ ,  $\epsilon_2$ . Высоту расположения антенны (приемно-передающей) над поверхностью покрытия (верхней границей структуры) обозначим  $d$ .

Предположим, что проведено два измерения: одно, когда антенна расположена строго над трещиной, а второе – когда антенна смещена на расстояние  $\Delta r$  (по горизонтали) от первого положения. Будем считать, что нам известно время прохождения сигнала от антенны до верхней границы трещины в этих двух случаях –  $t_1$  и  $t_2$  соответственно.

Теперь, привлекая закон Снеллиуса [1]:

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0\right) \cdot n_0 = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right) \cdot n_1; n_0 = \sqrt{\epsilon_0} = 1, n_1 = \sqrt{\epsilon_1}, \quad (1)$$

запишем основные уравнения, которые связывают известные параметры задачи с неизвестными (в приближении геометрической оптики):

$$\begin{cases} \frac{d}{c} + \frac{h_1 \cdot \sqrt{\epsilon_1}}{c} = \frac{t_1}{2} \\ \frac{d}{\sin \alpha_0 \cdot c} + \frac{h_1 \cdot \sqrt{\epsilon_1}}{\sin \alpha_1 \cdot c} = \frac{t_2}{2} \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0\right) = \sqrt{\epsilon_1} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right), (\epsilon_0 = 1) \end{cases}, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме, 30 см/нс.

Если диэлектрическая проницаемость верхнего слоя неизвестна, то три уравнения системы (2) содержат четыре неизвестные величины:  $\varepsilon_1$ ,  $h_1$ ,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ . Такая система, вообще говоря, не имеет единого решения. Если  $d \ll h_1$ , то для ее приближенного решения можно использовать параметры параболы, которая идентифицируется на экране монитора при проезде над объектом. В таком случае точное второе уравнение системы (2) заменяется приближенным, которое не учитывает время прохождения сигнала в свободном пространстве:

$$\frac{h_1 \cdot \sqrt{\varepsilon_1}}{\sin \alpha_1 \cdot c} = \frac{t_2}{2}. \quad (3)$$

Возможен и другой приближенный подход, основанный на пренебрежении преломлением волны при малых углах падения (больших сдвигах радара). Другими словами считается, что волна распространяется прямолинейно (без преломления), но с разной скоростью в разных средах. В таком случае второе уравнение может быть представлено в виде:

$$\frac{\sqrt{(d+h_1)^2 + (\Delta r)^2} \cdot \frac{d}{\Delta r}}{c} + \frac{\sqrt{(d+h_1)^2 + (\Delta r)^2} \cdot \frac{h_1}{\Delta r} \cdot \sqrt{\varepsilon_1}}{c} \approx \frac{t_2}{2}. \quad (4)$$

В соотношении (4) величина сдвига  $\Delta r$  предполагается известной. Тогда имеем систему двух уравнений с двумя неизвестными ( $h_1$  и  $\varepsilon_1$ ):

$$\begin{cases} \frac{d}{c} + \frac{h_1 \cdot \sqrt{\varepsilon_1}}{c} = \frac{t_1}{2} \\ \sqrt{(d+h_1)^2 + (\Delta r)^2} \cdot \frac{d}{\Delta r} + \sqrt{(d+h_1)^2 + (\Delta r)^2} \cdot \frac{h_1}{\Delta r} \cdot \sqrt{\varepsilon_1} \approx c \cdot \frac{t_2}{2} \end{cases} \quad (5)$$

Такая система является не только приближенной, но и нелинейной и ее решение – довольно сложный процесс. К тому же при реализации такой схемы возникает ряд дополнительных погрешностей (например, определение  $\Delta r$ ). Поэтому оценить итоговую погрешность довольно сложно. Существуют и другие подходы к решению данной задачи, например, [2, 3]. Однако эти методы предполагают обработку большого количества информации и довольно сложны с вычислительной точки зрения.

С другой стороны, существует методика определения диэлектрической проницаемости верхнего слоя дорожной одежды по измеренному значению коэффициента отражения  $R_0$ . В то же время в современных передвижных дорожных лабораториях существует возможность установления и одновременного использования нескольких антенных блоков. Поэтому предлагается использовать такую систему для первоначального определения диэлектрической проницаемости верхнего слоя со следующим использованием полученных значений в алгоритме определения глубины залегания дефекта (трещины).

Исходное выражение для определения диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_1$  по измеренному коэффициенту отражения  $R_0$  может быть получено из формул Френеля [1]:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \frac{(1 - R_0)^2}{(1 + R_0)^2}. \quad (6)$$

Зная  $\varepsilon_1$  можно определить толщину верхнего слоя из первого уравнения системы (2), которое перепишем в виде:

$$h_1 = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_1}} \left( \frac{t_1}{2} - \frac{d}{c} \right). \quad (7)$$

Таким образом, один из способов решения задачи определения глубины залегания трещины в нижнем слое асфальтобетонного покрытия сводится к:

- определению диэлектрической проницаемости верхнего слоя;



- измерению задержки сигнала, то есть времени прохождения сигнала от антенны до нижней границы верхнего слоя (начала трещины);
- вычислению глубины залегания дефекта (трещины) по формуле (7).

Следует подчеркнуть, что определение диэлектрической проницаемости верхнего слоя и глубины залегания трещины проводится по результатам зондирования дорожной одежды разными антенными блоками. Это связано с тем, что такие слабоконтрастные объекты как подповерхностные трещины не позволяют использовать для их обнаружения и позиционирования стандартные антенные блоки георадаров, а требуют привлечения специализированных антенных блоков.

Следующая практическая задача заключается в определении параметров трещины, то есть ее ширины. Эту задачу предлагается решать с помощью модификации компарационного алгоритма.

Суть данного подхода в сравнительном анализе сигнала, полученного в результате зондирования дорожной одежды, с набором эталонных сигналов от разных трещин. Основная идея, положенная в основу алгоритма, состоит в преобразовании сигналов из знакопеременных функций в неотрицательные с помощью применения к ним операции взятия модуля. Например, для функции временного распределения сигнала от конструкции  $f(t)$ :

$$\tilde{f}(t) = |f(t)|. \quad (8)$$

Аналогичная операция применяется и к эталонным радарограммам. После этого исчисляются соответствующие невязки:

$$N_i = \int_0^T (\tilde{f}(t) - \bar{F}_i(t))^2 dt, \quad (9)$$

где  $\bar{F}_i(t)$  – эталонные радарограммы.

В итоге, с помощью операции выбора наименьшего из функционалов  $N_i$  делается вывод о ширине трещины. Таким образом, в результате работы алгоритма на выходе получаем оценку местоположения дефекта, глубины его залегания и ширины. Данный алгоритм реализован в виде программы автоматизированного расчета.

Для проведения исследований по обнаружению, позиционированию и идентификации подповерхностных дефектов в лабораторных условиях использовались антенные блоки с дипольными антеннами и блок планарных щелевых антенн для регистрации кросс-поляризационной компоненты. Блок планарных щелевых антенн использовался для обнаружения подповерхностного дефекта, блок дипольных антенн – для идентификации и оценки геометрических параметров подповерхностных дефектов.

Для обработки получаемых данных использовались программы «GPR Proview» и «Geovis», разработанные на основе предложенных алгоритмов.

Лабораторные эксперименты проводились на моделях дорожных одежд, состоящих из нижнего слоя грунта либо песка толщиной от 15 см до 20 см, слоя щебня толщиной от 13 см до 20 см и двух-трех слоев асфальтобетона (крупно- и мелкозернистого). Типовая модель конструкции дорожной одежды с подповерхностным дефектом (трещиной) представлена на рисунке 2.

Экспериментальная проверка предложенных алгоритмов дефектоскопии проводилась в два этапа:

- определение диэлектрической проницаемости и толщины слоя покрытия над дефектом с целью определения глубины заложения дефекта (трещины);
- оценка высоты и ширины раскрытия трещины.

При проведении экспериментальных исследований варьировались:

- диэлектрическая проницаемость материала слоя покрытия над дефектом (путем применения слоев из разных материалов – применялся мелкозернистый и пористый асфальтобетон, имеющие разную диэлектрическую проницаемость);
- глубина заложения дефекта (путем изменения толщины покрытия над дефектом);
- высота подповерхностного дефекта (трещины, путем изменения толщины слоя, содержащего дефект).

В результате обработки георадарных данных оценивались:

- значение диэлектрической проницаемости слоя покрытия над дефектом (табл. 1);
- глубина заложения дефекта (табл. 2);
- высота дефекта (табл. 2).

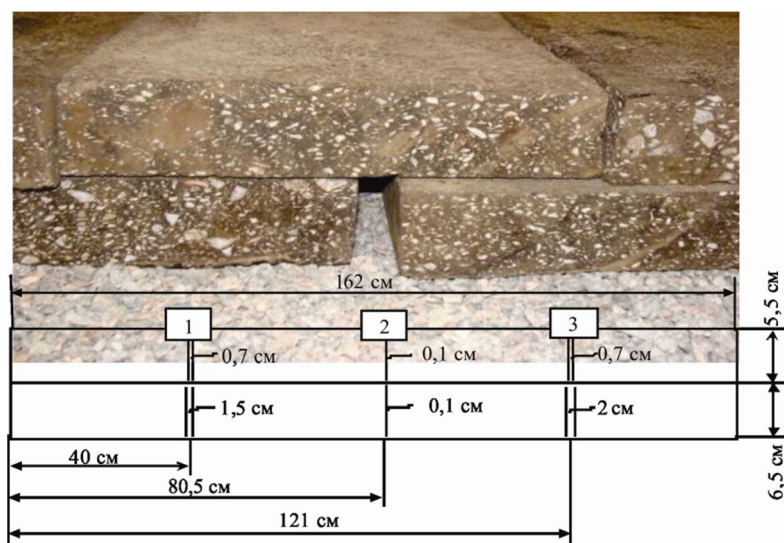


Рисунок 2 – Модель дорожной одежды

Таблица 1 – Диэлектрическая проницаемость асфальтобетонного покрытия над дефектом

Табличное значение диэлектрической проницаемости	Определенное на моделях известной толщины	Определенное путем обработки сигналов
7	6,8	6,58
5	4,95	5,12
7	7,01	6,92

Таблица 2 – Оценка геометрических параметров подповерхностных дефектов

Параметр	Значение параметра			
	фактическое		определенное путем обработки сигналов	
Глубина заложения дефекта, см	5,0	6,2	4,92	5,94
Высота трещины, см	10,0	6,0	10,52	6,05




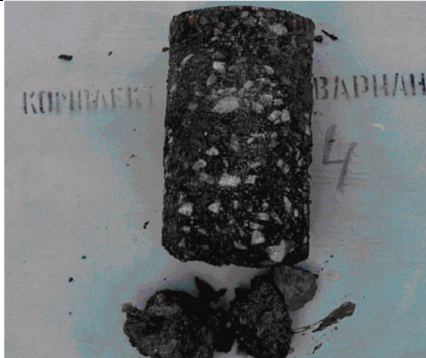


Анализ полученных результатов позволил подтвердить возможность обнаружения и идентификации трещин в нижних слоях покрытия.

Результаты проведенных лабораторных экспериментов могут быть использованы при георадарном обследовании автомобильных дорог на этапе эксплуатации. Целью георадарного обследования дорожных одежд являлось определение толщины конструктивных слоев дорожной одежды, выявление подповерхностных дефектов и установление возможных причин развития деформаций. Сканирование участков велось в продольном и поперечном направлениях. Для проверки достоверности определения подповерхностных дефектов, определенных по результатам георадарного сканирования, проводились дополнительные инструментальные оценки:

- толщины и состояния конструктивных слоев дорожных одежд (путем отбора кернов из конструкции);
- общего модуля упругости конструкции (путем измерения упругого прогиба методом статического нагружения);
- влажности грунтов земляного полотна (путем измерения на обочине на глубине 50 см с помощью влагомера).

Результаты инструментальной оценки представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты полевых обследований автомобильных дорог

Характеристика участка	Влажность, %	Общий модуль упругости, МПа	Керн
<p>км 396 + 700 (марка 1) Конструкция: асфальтобетон 2 слоя – 14 см; смесь из доменных шлаков – 17 см; песок мелкий – 18 см</p>	<p>13,9</p> 	264	
<p>км 403 + 000 (марка 3) Конструкция: асфальтобетон 2 слоя – 12 см; смесь из доменных шлаков – 13 см</p>	<p>17,4</p> 	167	
<p>км 416 + 300 (марка 4) Конструкция: асфальтобетон 2 слоя – 15 см; смесь из доменных шлаков – 25 см; щебень рядовой – 15 см; песок мелкий – 20 см</p>	<p>15,1</p> 	290	

По результатам сканирования поперечного профиля на марке №1 определена толщина слоев дорожной одежды, подповерхностных дефектов не выявлено. По результатам визуальной оценки на покрытии имеется незначительная сетка трещин. По результатам отбора кернов определено, что конструкция находится в удовлетворительном состоянии. Следовательно, основной причиной развития сетки трещин является усталостное разрушение асфальтобетонного покрытия.

Как свидетельствуют результаты сканирования поперечника на марке №3, в конструкции дорожной одежды наблюдается повышенная влажность слоев и грунтов земляного полотна. По результатам отбора кернов определено, что слои основания переувлажнены, имеет место старение битума, нижний слой асфальтобетонного покрытия допускает разборку ручную, что свидетельствует о значительном снижении прочностных характеристик материалов конструкции дорожной одежды. По результатам комплексного обследования участка дороги на марке №3 установлено, что первопричиной преждевременного разрушения конструкции дорожной одежды является необеспеченный водоотвод от земляного полотна, что необходимо учитывать при планировании и назначении мероприятий по ремонту данного участка дороги.

Заслуживают внимания результаты георадарного сканирования участка дороги на марке №4. По результатам визуального обследования участок находится в отличном состоянии,

верхний слой покрытия – тонкослойный асфальтобетон. Сканирование дорожной одежды и дальнейшая интерпретация радарограмм на данном участке позволили установить, что основание из доменного шлака, укрепленного цементом, фактически разделено на отдельные небольшие блоки. Наличие подповерхностных трещин в слое основания будет являться одним из факторов, способствующих восходящему трещинообразованию и преждевременному разрушению покрытия. Таким образом, проведенные комплексные лабораторные и полевые обследования доказали возможность использования георадаров для определения важнейших характеристик материалов и конструкций дорожных одежд – влажности и степени уплотнения, а также наличия подповерхностных трещин и их идентификации. Тем самым подтверждена эффективность георадарных технологий для получения достаточно полной информации о состоянии конструкций дорожных одежд.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн, М. Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
2. Воскресенский, Ю.Н. Построение сейсмических изображений [Текст]. – М.: Российский университет нефти и газа им. И.М. Губкина, 2006. – 117 с.
3. Капустин, В.В. Применение георадарного метода в квазигомогенных средах [Текст] / В.В. Капустин, Р.Р. Денисов, А.О. Мойланен // Сборник материалов пятой Всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям земли. – ЭМЗ-2011. – Т. 2. – С. 343 – 346.

#### **Батракова Анжелика Геннадьевна**

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, г. Харьков, Украина

Кандидат технических наук, доцент кафедры изысканий и проектирования автомобильных дорог и аэродромов

Тел.: +38 (057) 70-73-732

E-mail: agbatr@mail.ru

---

A.G. BATRAKOVA

### **POSITIONING AND IDENTIFICATION OF SUBSURFACE DEFECTS IN CONSTRUCTIVE LAYERS OF PAVEMENT**

*Models, algorithms and software for the automated calculation of positioning and identification of subsurface defects in the structural layers of the pavement are developed. Results of laboratory and field experiments to test the adequacy of the developed models and algorithms are presented.*

**Keywords:** *GPR technology, pavement, subsurface defects, fracture parameters, survey of roads.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Born, M. Osnovy optiki [Tekst] / M. Born, Je. Vol'f. – M.: Nauka, 1973. – 720 s.
2. Voskresenskij, Ju.N. Postroenie sejsmicheskij izobrazhenij [Tekst]. – M.: Rossijskij universitet nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2006. – 117 s.
3. Kapustin, V.V. Primenenie georadarnogo metoda v kvaziodnorodnyh sredah [Tekst] / V.V. Kapustin, R.R. Denisov, A.O. Mojlanen // Sbornik materialov pjatoj Vserossijskoj shkoly-seminara im. M.N. Berdichevskogo i L.L. Van'jana po jelektromagnitnym zondirovanijam zemli. – JeMZ-2011. – T. 2. – S. 343 – 346.

#### **Batrakova Angelika Gennadievna**

Kharkov national automobile and highway university, Kharkov, Ukraine

Candidate of technical science, assistant professor of department «Researches and designing highways and airports»

Ph.: +38 (057) 70-73-732

E-mail: agbatr@mail.ru

ИЛИОПОЛОВ С.К., ЧЕРНОВ С.А., МАРДИРОСОВА И.В., ЕРЕМЕНКО Е.А.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ ВЯЗКИХ ДОРОЖНЫХ БИТУМОВ И НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИХ СНИЖЕНИЯ

*В работе представлены результаты исследования процессов старения вязких дорожных битумов, происходящих при смешении их с горячим каменным материалом, по методике ASTM 1754/ D 1754 M – 09 (метод испытаний битума в тонкой пленке до и после прогрева). Показано, что регламентируемые требованиями ГОСТ 22245-90 показатели свойств битумных вяжущих не отражают реальных условий эксплуатации дорожных покрытий и требуют приведения их нормативных значений в соответствии с реальными условиями. Отмечены принципиальные отличия нормативных требований к дорожным битумам за рубежом и в нашей стране и необходимость разработки предложений по гармонизации требований к отечественным битумам до уровня европейских стандартов.*

**Ключевые слова:** вязкие дорожные битумы, процессы старения, физико-механические свойства битумов, нормативные требования.

Проблемы дорожного строительства (качество дорог) неразрывно связаны с вопросами обеспечения отрасли качественными материалами и, прежде всего, главным компонентом асфальтобетонного покрытия – битумным вяжущим. Низкое качество битума, который сейчас применяется при строительстве – одна из основных причин удручающего состояния многих российских дорог. На состояние наших дорог в значительной степени влияет суровый климат с многократным переходом температуры через ноль градусов. У европейских дорожников климат значительно мягче, лучше техника, финансирование и качество материалов. Главная беда наших дорожников – нет стабильности вяжущего, без которой трудно рассчитывать на серьезное улучшение дорожного строительства с достижением европейского уровня [1, 2]. Низкие эксплуатационные характеристики материалов, используемых в дорожном строительстве, приводят к тому, что уже на 3-4 год требуется проведение ремонта дорог, тогда как за рубежом межремонтный период составляет 10-12 лет. Обследование состояния в 2011 г. автодороги М-4 «ДОН» южных регионов Российской Федерации (Краснодарского и Ставропольского краев, Ростовской области) выявило колебательность глубиной от 5 до 11 см, трещины, выбоины, разрушение кромки и т.д. Все это приводит к неоправданно высоким затратам на ремонт покрытий, а, следовательно, сдерживает развитие сети автомобильных дорог с твердым покрытием.

Одной из важных задач повышения эксплуатационной надежности дорожных покрытий является необходимость изменения качества дорожного битума. Испытания битумов российского и зарубежного производства на соответствие требованиям ГОСТ 22245-90 к зарубежным стандартам показали принципиальные отличия нормативных требований к дорожным битумам за рубежом и в нашей стране. Суть зарубежных стандартов заключается в регламентировании качества битума уже находящегося в составе горячей асфальтобетонной смеси, а не в хранящейся товарной емкости нефтеперерабатывающего завода или сырьевой емкости асфальтобетонного завода, как это предусматривается ГОСТ 22245-90.

В связи с этим возникла необходимость изучения зарубежного опыта и проведения комплексных исследований зависимости долговечности асфальтобетонных покрытий от особенностей физико-механических свойств используемого дорожного битума. Видимо необходима разработка новых требований к отечественным битумам с особым вниманием к вопросам гармонизации их с европейскими стандартами [3]. Значительный интерес в этом отношении представляет изучение процессов старения битумов, происходящих при их смешении с горячим каменным материалом по методике ASTM 1754/ D 1754 M – 09 (метод испытаний битума в тонкой пленке до и после прогрева).

В данном методе пленка битумного вяжущего нагревается в течение 5 часов при 163°C. Воздействие тепла и воздуха определяется по изменению физико-механических свойств вяжущего до и после прогрева в термостате. Определялись изменения пенетрации, массы, дуктильности, температур размягчения и хрупкости, сцепление битума с минеральными материалами в соответствии с ГОСТ 11501, ГОСТ 11506, ГОСТ 11505, ГОСТ 11507 с дополнениями по п. 3.2, ГОСТ 4333, ГОСТ 18180. Качество сцепления битумного вяжущего с поверхностью кислых пород (гранитом) или с поверхностью используемого щебня для приготовления асфальтобетонных смесей проводилось по ГОСТ 12801, п. 28. В работе исследовались пробы вяжущих, отобранные в Южном регионе страны: Краснодарском и Ставропольском краях, а также в Ростовской области.

Нагрев исследуемых проб вяжущих проводился в течение 5 часов при температуре 163°C в термостате с электрическим нагревом, позволяющим устанавливать приблизительное изменение свойств битума в процессе стандартного горячего смешения асфальтобетона при температуре примерно 150°C. В результате образуется остаток, который ориентировочно характеризует состояние битума, включенного в состав дорожного покрытия. Если температура смешения отличается от уровня 150°C, то это существенно будет влиять на свойства материала [3].

Термостат снабжен металлической круглой полкой диаметром 310 мм. Конструкция полки обеспечивает плоскую поверхность, поддерживающую контейнеры. Полка подвешена на вертикальном валу и снабжена механическими средствами ее вращения со скоростью 5,5 об/мин. Контейнер – цилиндрические лотки с внутренним диаметром  $140 \pm 1$  мм и глубиной  $9,5 \text{ мм} \pm 1,5 \text{ мм}$  с плоским дном. Пятьдесят мл пробы в контейнере такого размера позволяют получить пленку толщиной 3,2 мм.

Необходимое количество испытуемого материала помещалось в подходящий контейнер и нагревалось до жидкого состояния. Для получения количественной величины изменения массы пробы битума на тепловое старение охлаждались до комнатной температуры, после чего определялась масса пробы с точностью до 0,001 г.

Определение стандартных показателей физико-механических свойств битума после прогрева в течение 5-ти часов при 163°C проводили по методике испытаний, описанной в стандарте ASTM 1754/ D 1754 M – 09. В таблице 1 приведены результаты сравнительных исследований физико-механических свойств битумных вяжущих до прогрева и после прогрева по методике этого стандарта.

Представленные данные свидетельствуют о понижении после прогрева таких показателей битумов как «глубина проникания иглы» и «растяжимость при 25°C». Остаточные значения их снижаются от первоначальных в пределах для: пенетрации от 58 до 79%, а растяжимости – в среднем до значений на 60-83%. Такие значительные изменения показателей свидетельствуют о склонности исследуемых вяжущих к процессам старения.

Наблюдаются также большие отклонения от первоначальных значений температур размягчения и хрупкости вяжущих, которые повышаются в этом процессе на 6-9°C и от 0 до 6°C соответственно.

Потери масс у исследуемых проб битумов (табл. 2) при прогреве незначительны (в пределах 0,01-0,04%), что, видимо, может служить свидетельством протекания в этом случае, наряду с процессами потери вяжущим легких фракций, встречных окислительных процессов старения, сопровождающихся увеличением масс, главным образом за счет асфальтенов.

Проведенные исследования показали, что качественные показатели используемых вяжущих в основном соответствуют требованиям ГОСТ 22245 к битуму марки БНД 60/90 [4]. Однако им свойственна повышенная потеря свойств при прогреве, что не гарантирует надежную работу битумов в асфальтобетонных смесях, значительно стареют и не отвечают современным требованиям строительства и эксплуатации дорог в России.

В таблице 2 приведены изменения физико-механических показателей вяжущих до и после старения (в % от первоначальной величины) в сравнении со значениями этих величин в стандартах ряда европейских стран, что также указывает на большие отклонения свойств исследуемых битумов от требований этих стандартов.



**Таблица 1 – Физико-механические показатели проб битума по паспортным данным и испытаний проведенных ООО «ДорТрансНИИ-РГСУ» до и после прогрева по методике стандарта ASTM 1754/D 1754М-09**

№ п/п	Наименование пробы	Глубина проникания иглы, 0,1 мм, по ГОСТ 11501		КИШ, °С по ГОСТ 11506	Растяжимость при 25°С, см по ГОСТ 11505	Температура хрупкости, °С по ГОСТ 11507 с дополнениями п. 3.2	Потеря массы, % массовый, по ASTM D 1754	Сцепление битума с каменным материалом		Температура вспышки, °С по ГОСТ 4333
		При 25°С	При 0 °С					ГОСТ 11508	ГОСТ 12801-98	
Требования ГОСТ 22245-90										
		61-90	Не менее 20	Не менее 47	Не менее 55	Не выше -15	-			Не ниже 230
1	ДСУ-2 Ставропольский край, Шпаковский район г.Михайловск (7.02.11 г.)									
	A	79	25	48	80	-23	-	контр обр. №2	-	298
	B	59	24	49	64	-20	-	-	2	270
	C	44	14	55	21	-23	-	-	3-	-
2	СУ-869 Ростовская область, г. Миллерово (16.03.11 г.)									
	A	74	22	49	100	-19	-	контр обр. №2	-	292
	B	71	24	51	74	-20	-	-	2	273
	C	56	22	56	19	-20	-	-	3-	-
3	«Кубаньдорблагаустройство» г. Краснодар (проба № 1 от 14.03.11 г.)									
	A	85	25	48	105	-24	-	контр обр. №2	-	312
	B	76	33	48	76	-23	-	-	2	289
	C	51	22	57	16	-22	-	-	3-	-
4	«Кубаньдорблагаустройство» г. Краснодар (проба № 2 от 13.03.11 г.)									
	A	77	24	50	95	-24	-	контр обр. №2	-	248
	B	65	27	49	51	-23	-	-	2	257
	C	47	20	56	17	-21	-	-	3-	-
5	Тоннельный отряд 44, г.Сочи, Новороссийское шоссе 7а (проба № 1 от 28.03.11 г.)									
	A	76	24	49	83	-23	-	контр обр. №2	-	312
	B	69	26	51	88	-22	-	-	2	299
	C	51	20	59	16	-19	-	-	3-	-
6	Тоннельный отряд 44, г.Сочи, Новороссийское шоссе 7а (проба № 2 от 13.03.11 г.)									
	A	87	26	48	86	-24	-	контр обр. №2	-	312
	B	61	26	51	42	-23	-	-	2	321
	C	44	20	58	7	-20	-	-	3-	-
7	ОАО «ДРСУ» г.Ростов-на-Дону (08.04.11 г.)									
	A	80	21	50	150	-17	-	контр обр. №2	-	248
	B	62	23	50	100	-20	-	-	2	257
	C	42	17	56	52	-17	-	-	3-	-
8	ООО «РОМЕКС-КУБАНЬ» Краснодарский край, ст.Павловская (проба № 1 от 14.03.11 г.)									
	A	83	25	49	85	-23	-	контр обр. №2	-	312
	B	78	31	49	87	-23	-	-	2	321
	C	54	23	58	19	-20	-	-	3-	-
9	ООО «РОМЕКС-КУБАНЬ» Краснодарский край, ст.Павловская (проба № 2)									
	A	-	-	-	-	-	-	контр обр. №2	-	248
	B	76	34	51	84	-26	-	-	2	262
	C	54	22	57	25	-22	-	-	3-	-
10	СКФ ООО «Дорога» Ростовская область, г. Каменск-Шахтинский (проба № 1 от 28.03.11 г.)									
	A	76	24	49	83	-23	-	контр обр. №2	-	312
	B	79	31	49	89	-26	-	-	2	321
	C	51	20	56	21	-20	-	-	3-	-
11	СКФ ООО «Дорога» Ростовская область, г. Каменск-Шахтинский (проба № 2 от 18.04.11 г.)									
	A	73	25	50	78	-22	-	контр обр. №2	-	312
	B	64	26	49	48	-20	-	-	2	321
	C	43	22	56	19	-20	-	-	3-	-
12	СКФ ООО «Дорога» Ростовская область, г. Каменск-Шахтинский (проба № 3 от 18.04.11 г.)									
	A	80	25	47	92	-22	-	контр обр. №2	-	312
	B	77	27	49	80	-23	-	-	2	321
	C	53	21	56	19	-19	-	-	3-	-
13	ОАО «Автобан», Краснодарский край (12.04.11 г.)									
	A	78	24	50	150	-18	-	контр обр. №2	-	248
	B	73	30	50	77	-19	-	-	2	262
	C	51	23	58	17	-19	-	-	3-	-
14	СУ 873 «Доназдорстрой», г. Воронеж (03.04.11 г.)									
	A	68	23	51	100	-20	-	контр обр. №2	-	312
	B	66	22	50	78	-22	-	-	2	321
	C	46	23	57	21	-17	-	-	3-	-
15	г. Рязань (04.04.11 г.)									
	A	-	-	-	-	-	-	контр обр. №2	-	248
	B	69	28	50	100	-17	-	-	2	257
	C	40	16	57	27	-12	-	-	3-	-

A – Паспортные данные.

B – Результаты испытания, проведенные в лаборатории ООО «ДорТрансНИИ-РГСУ».

C – Результаты испытания, проведенные в лаборатории ООО «ДорТрансНИИ-РГСУ» после прогрева по методике ASTM D 1754/D 1754М-09.

Таблица 2 – Изменение физико-механических показателей исследуемых проб битумов после прогрева, полученные в «ДорТрансНИИ-РГСУ», по методике стандарта ASTM 1754/D 1754M-09.

№ п/п	Объекты	Глубина проникания иглы при 25°C после прогрева, % от первоначальной величины	Температура размягчения в °C	Растяжимость при 25°C, см	Температура хрупкости после прогрева, °C	Потеря массы, %
Изменения показателей проб битума полученные в «ДорТрансНИИ-РГСУ» после прогрева						
1	ДСУ-2 Ставропольский край, Шпаковский район г. Михайловск (7.02.11 г.)	75	6	33	3	0,01
2	СУ-869 Ростовская область, г. Миллерово (16.03.11 г.)	79	5	26	0	0,04
3	«Кубаньдорблагострой» г. Краснодар (проба №1 от 14.03.11 г.)	67	9	21	1	0,04
4	«Кубаньдорблагострой» г. Краснодар (проба № 2 от 13.03.11 г.)	72	7	33	2	0,04
5	Тоннельный отряд 44, г. Сочи, Новороссийское шоссе 7а (проба № 1 от 28.03.11 г.)	74	8	18	3	0,03
6	Тоннельный отряд 44, г. Сочи, Новороссийское шоссе 7а (проба № 2 от 13.03.11 г.)	72	7	17	3	0,03
7	ОАО «ДРСУ» г. Ростов-на-Дону (08.04.11 г.)	68	6	52	3	0,02
8	ООО «РОМЕКС-КУБАНЬ» Краснодарский край, ст. Павловская (проба № 1 от 14.03.11 г.)	69	9	22	3	0,04
9	ООО «РОМЕКС-КУБАНЬ» Краснодарский край, ст. Павловская (проба № 2)	71	6	30	4	0,039
10	СКФ ООО «Дорога» Ростовская область, г. Каменск-Шахтинский (проба № 1 от 28.03.11 г.)	65	7	24	6	0,02
11	СКФ ООО «Дорога» Ростовская область, г. Каменск-Шахтинский (проба № 2 от 18.04.11 г.)	67	7	40	0	0,012
12	СКФ ООО «Дорога» Ростовская область, г. Каменск-Шахтинский (проба № 3 от 18.04.11 г.)	69	7		4	0,01
13	ОАО «Автобан», Краснодарский край (12.04.11 г.)	70	8	24	0	0,03
14	Воронеж СУ 873 «Донаэродорстрой» (03.04.11 г.)	70	7	27	5	0,021
Требования к качеству дорожных битумов, предъявляемые в ряде европейских стран, после прогрева при 163°C в течение 5 часов						
15	г. Рязань (04.04.11 г.)	58		27	5	0,009
16	Германия (В 65)	не менее 40	не более 10	не менее 50	не выше -6	не более 1,0
17	Финляндия (ВГТ 80)	не менее 65	-	не менее 50	не выше -10	не более 1,0
18	Литва (В 50/70)	не менее 50	не более 9	не менее 25	-	не более 0,5
19	Беларусь (БД 60/90)	не менее 60	не более 5	-	-	не более 0,5
20	БДУ 70/100 по ТУ 38.1011356-91	не менее 65	-	не менее 100	не выше -15	не более 0,3
21	БДУС 70/100 по ТУ 0256-096-00151807-97	не менее 60	-	не менее 100	не выше -15	не более 0,3
22	БДУ 70/100 по методике EN 12 607-2	не менее 65	не более 11	не менее 140	не выше -17	-
23	БДУ 70/100	не менее 65	-	не менее 100	не выше -15	не более 0,3

Кроме того, наблюдались значительные расхождения паспортных данных по качественным показателям битумов от результатов, полученных для битумов, отобранных уже на АБЗ. Последние показали более низкие показатели, чем по паспортным данным, что, видимо, является свидетельством процесса старения битумов при их доставке и хранении на АБЗ. (см. табл. 1). В первую очередь, это касается таких показателей, как глубина проникания иглы при 25°C, растяжимость, температура хрупкости, качество сцепления битумного вяжущего с минеральными материалами. Так, расхождения с паспортными данными показателей глубины проникания иглы при 25°C в некоторых случаях составляло 38%, температуры хрупкости – 10%, растяжимости – 60-85%.

Следует отметить и тот факт, что температура хрупкости применяемых при строительстве автодорог битумов, как правило, оказывалась выше минус 20°C, хотя и соответствовала требованиям ГОСТ 22245-90 (см. табл. 1). Температура же наиболее холодных суток в Российской Федерации на большей части ее территории (на 65% территории) имеет показания ниже минус 25-35°C и на 35% территории – ниже минус 40°C (СНиП 23.01-99).



Расчетная температура сдвигоустойчивости дорожного покрытия на территории РФ в основном соответствует значениям выше  $+55^{\circ}\text{C}$ , в то время как температура размягчения выпускаемых битумов всегда ниже этого значения  $45\text{--}50^{\circ}\text{C}$  (см. табл. 1).

Таким образом, регламентируемые требованиями ГОСТ 22245-90 показатели свойств битумных вяжущих не отражают реальных условий эксплуатации дорожных покрытий и требуют приведения их нормативных значений в соответствии с реальными условиями. Необходимо, чтобы новые стандарты отражали допустимые пределы изменений показателей свойств битумов в процессе испытания их на термостабильность, имитирующей условия воздействия на битумную пленку кислорода воздуха при повышенной температуре в асфальтосмесителе при изготовлении горячих асфальтобетонных смесей. Назрела острая необходимость заменить существующую «варварскую» высокотемпературную технологию подготовки битума к использованию на низкотемпературную. Снижение температурного режима подготовки битума со  $150^{\circ}\text{C}$  до  $105\text{--}110^{\circ}\text{C}$  позволит не только сохранить необходимые свойства материала, но и значительно уменьшить энергозатраты [5].

Основные качественные показатели дорожных битумов, вырабатываемых предприятиями нефтепереработки, за последние тридцать лет не претерпели существенных изменений. Идентичность стандартов на дорожные битумы ГОСТ 22245-90 и ГОСТ 22245-76 очевидна. Нормируемые этими стандартами показатели качества битумов просто не могли быть существенно улучшены, поскольку неизменными в течение всего этого периода оставались требования к качеству битумного сырья и технология производства битумов, которая сводится к прямому окислению исходного нефтепродукта.

Необходима разработка и нормативного документа (ГОСТ Р) на сырье для производства дорожных битумов. Требуется также сузить диапазон, в котором варьируются уровни качества битумов в пределах одной марки. Это увеличит однородность асфальтобетонных смесей, улучшит коэффициент варьирования показателей качества, а, следовательно, и срок службы покрытий. Особое внимание следует уделить разработке предложений по гармонизации требований к отечественным битумам на уровне европейских стандартов. Действующая нормативная база не отражает всего многообразия современных отечественных и зарубежных технологий строительства, новых средств механизации и транспорта, материалов и оборудования, объективно необходимых производственных затрат [1-7].

Предлагаемые нефтеперерабатывающими предприятиями так называемые «новые технологии» направлены на уменьшение содержания более легких нефтяных углеводородов в битумах [6]. Это естественно приводит к снижению трещиностойкости битумов, которая и без того недостаточна для наших климатических условий. Необходимо улучшить качество сырья для битумного производства за счет исключения отбора легких углеводородов, оптимизации его группового химического состава путем введения модифицирующих добавок, использования активирующего воздействия энергетических полей (например, ультразвука, виброполя) и т.п. [6, 7].

Требуется пересмотра и техническая политика в области хранения битумов: около 80% их общего объема содержится в подземных стационарных хранилищах, где материал неминуемо обводняется. Целесообразно также сузить диапазон, в котором варьируются уровни качества битумов в пределах одной марки. Это увеличит однородность асфальтобетонных смесей, коэффициент варьирования показателей качества и, следовательно, срок службы покрытий.

### Выводы

В работе отмечено значительное понижение показателей свойств вязких дорожных битумов, подвергнутых прогреву по методике ASTM 1754/ D 1754 M – 09), свидетельствующее о склонности исследуемых вяжущих к процессам старения и не обеспечивающее получение на их основе качественных асфальтобетонных смесей.

Одной из важных задач повышения эксплуатационной надежности дорожных покрытий является необходимость изменения качества дорожного битума.

Действующая нормативная база в нашей стране не отражает всего многообразия современных отечественных и зарубежных технологий строительства, новых средств механизации

и транспорта, материалов и оборудования, используемых в дорожном строительстве. Основные качественные показатели дорожных битумов, вырабатываемых предприятиями нефтепереработки, за последние тридцать лет не претерпели существенных изменений. Идентичность стандартов на дорожные битумы ГОСТ 22245-90 и ГОСТ 22245-76 очевидна. Отмечены принципиальные отличия нормативных требований к дорожным битумам за рубежом и в нашей стране и следует уделить особое внимание разработке предложений по гармонизации требований к отечественным битумам на уровне европейских стандартов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Худякова, Т.С. О битумах вязких замолвите слово [Текст] / Т.С. Худякова // Мир дорог. – 2007. – №27. – С. 61-65.
2. Худякова, Т.С. О нормативных требованиях к дорожному битуму как материалу целевого назначения [Текст] / Т.С. Худякова // Автомобильные дороги. – М., 2008. – №2.
3. Кутын, Ю.А. Высокие требования к стандартам. О взаимодействии между качеством дорожных битумов и технологией их производства [Текст] / Ю.А. Кутын, Г.Н. Викторова, Э.Г. Теляшов. – М.: Автомобильные дороги. – 2010. – №1. – С. 58-59.
4. Бабаев, В.И. Если битумы соответствуют ГОСТу, почему дороги разрушаются раньше срока? [Текст] / В.И. Бабаев // Автомобильные дороги. – 2004. – №12. – С. 24-26.
5. Ворожейкин, В.М. В чем долговечность асфальтового бетона? О влиянии уровня энерговоздействия на структуру битумных пленок и свойства асфальтового бетона [Текст] / В.М. Ворожейкин // Автомобильные дороги. – 2009. – №7. – С. 44-47.
6. Кандрашин, В.Г. Технология качества. Стратегия развития битумного производства [Текст] / В.Г. Кандрашин // «ГАЗПРОМ НЕФТЬ». Стратегия развития битумного производства. Уфа: журнал ОАО «Татнефть». – №4 (2010). – С. 54-57.
7. Золотарев, В.А. Сырье под контролем. Физико-химические свойства и структурно-реологический тип битума в зависимости от качества сырья [Текст] / В.А. Золотарев // Автомобильные дороги. – 2010. – №1. – С. 52-54.

**Илиополов Сергей Константинович**

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Доктор технических наук, профессор

**Чернов Сергей Анатольевич**

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Ассистент

**Мардиросова Изабелла Вартановна**

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Кандидат химических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и аэродромы»  
Тел.: +7 (863) 263-77-76

**Еременко Евгений Александрович**

Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону  
Магистр

---

S.K. ILIOPOLOV, S.A. CHERNOV, I.V. MARDIROSOVA, E.A. EREMENKO

### STUDY OF THE PROCESSES OF AGING OF VISCOUS BITUMEN AND SOME ASPECTS OF THEIR REDUCTION

*The results of the study of aging processes occurring viscous road bitumen by mixing them with a hot stone material by ASTM 1754 / D 1754 M - 09 (test method in a thin film of bitumen before and after heating). It is shown that the regulated GOST 22245-90 performance properties of bituminous binders do not reflect the actual operating conditions of road surfaces and require adjustment to normal values in accordance with the actual conditions. Marked by fundamental differences of regulatory requirements for road bitumen abroad and in our country and the need to develop proposals for harmonization of requirements for domestic bitumen to the European standards.*

**Keywords:** *viscous bitumen road, aging, physical and mechanical properties of bitumen, regulatory requirements.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Hudjakova, T.S. O bitumah vjazkih zamolvite slovo [Tekst] / T.S. Hudjakova // Mir dorog. – 2007. – №27. – S. 61-65.
2. Hudjakova, T.S. O normativnyh trebovanijah k dorozhnomu bitumu kak materialu celevogo naznachenija [Tekst] / T.S. Hudjakova // Avtomobil'nye dorogi. – M., 2008. – №2.
3. Kut'in, Ju.A. Vysokie trebovanija k standartam. O vzaimodejstvii mezhdru kachestvom dorozhnyh bitumov i tehnologij ih proizvodstva [Tekst] / Ju.A. Kut'in, G.N. Viktorova, Je.G. Teljashov. – M.: Avtomobil'nye dorogi. – 2010. – №1. – S. 58-59.
4. Babaev, V.I. Esli bitumy sootvetstvujut GOSTu, pochemu dorogi razrushajutsja ran'she sroka? [Tekst] / V.I. Babaev // Avtomobil'nye dorogi. – 2004. – №12. – S. 24-26.
5. Vorozhejkin, V.M. V chem dolgovechnost' asfal'tovogo betona? O vlijanii urovnja jenergovozdejstvija na strukturu bitumnyh plenok i svojstva asfal'tovogo betona [Tekst] / V.M. Vorozhejkin // Avtomobil'nye dorogi. – 2009. – №7. – S. 44-47.
6. Kandrashin, V.G. Tehnologija kachestva. Strategija razvitija bitumnogo proizvodstva [Tekst] / V.G. Kandrashin // «GAZPROM NEFT'». Strategija razvitija bitumnogo proizvodstva. Ufa: zhurnal OAO «Tatneft'». – №4 (2010). – S. 54-57.
7. Zolotarev, V.A. Syr'e pod kontrolem. Fiziko-himicheskie svojstva i strukturno-reologicheskij tip bituma v zavisimosti ot kachestva syr'ja [Tekst] / V.A. Zolotarev // Avtomobil'nye dorogi. – 2010. – №1. – S. 52-54.

### **Ilioplov Sergey Konstantinovich**

Rostov state university of civil engineering, Rostov-on-Don  
Doctor of technical science, professor

### **Chernov Sergey Anatolyevich**

Rostov state university of civil engineering, Rostov-on-Don  
Assistant

### **Mardirosova Isabella Vartanovna**

Rostov state university of civil engineering, Rostov-on-Don  
Candidate of chemistry, associate professor of department «Highways and airfields»  
Ph.: +7 (863) 263-77-76

### **Eremenko Evgeny Aleksandrovich**

Rostov state university of civil engineering, Rostov-on-Don  
Master

КАНАЕВ А.Ю., ХРИСТОФОРОВА И.А., ХРИСТОФОРОВ А.И.

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПЕНОАЛЮМОСИЛИКАТЫ**

*В статье представлены результаты современных исследований по усовершенствованию составов и технологии получения теплоизоляционных пеноалюмосиликатных материалов, при изготовлении которых в качестве основного сырья используются природные и техногенные ресурсы, а также различного вида модифицирующие добавки, которые позволяют получать изделия с улучшенными свойствами при уменьшении энергетических затрат на производство.*

**Ключевые слова:** теплоизоляция, пеноалюмосиликат, модификаторы, техногенные отходы.

Важнейшей целью теплоизоляции строительных конструкций является сокращение расхода энергии на отопление здания, а также потерь тепла в промышленных агрегатах и теплотрассах. С целью улучшения теплоизоляции жилых, коммерческих и социальных строительных объектов, а также теплоизоляции систем коммуникаций водо- и теплоснабжения в регионах всегда применяют теплоизоляционные материалы.

На сегодняшний день теплоизоляция из пеноалюмосиликатов является наиболее эффективной и долговечной. Она представляет собой неорганический силикатный аморфный материал, содержащий в своем объеме значительное количество газовой фазы. Прочная пористая структура материала обеспечивает высокую теплоизоляцию фасадов, подвалов и кровель зданий. При этом теплоизоляция не теряет свои свойства со временем. При повышенной влажности и температуре материал не разрушается и сохраняет форму.

Как и пеностекло, пеноалюмосиликат является неорганическим теплоизоляционным материалом с ячеистой структурой [1]. Он обладает рядом ценных свойств, выгодно отличающих его от многих других теплоизоляционных материалов: пористость 80-95%, размер пор 0,1-3,0 мм, плотность 100-600 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность 0,06-0,14 Вт/(м·°C), предел прочности при сжатии 2-6 МПа. Материалы из пеноалюмосиликатов обладают высокой огнестойкостью, водостойкостью, морозостойкостью, несгораемостью, высоким коэффициентом звукопоглощения, кроме того, они экологически безопасны, что позволяет использовать их во внутренних помещениях. Материал имеет отличную адгезию к цементной связке, легко обрабатывается и монтируется.

Известно несколько способов получения ячеистой структуры пеностекла. Наибольшее распространение получил порошковый способ, позволяющий регулировать физико-механические свойства пеностекла в широких пределах за счет изменения вида газообразователя, химического состава стекла, температурного режима обработки. Промышленность производит по этому способу несколько видов пеностекла: монтажное, строительно-изоляционное, звукоизолирующее, фильтрующее, специальное температуростойкое [1].

Блочный и гранулированный строительный пеносиликатный материал изготавливается из смеси тонкоизмельченного стекла (специально сваренного или боя) и газообразователя или из смесей тонкоизмельченных природных алюмосиликатных пород с технологическими добавками без предварительной варки стекла из них.

Недостатками известных составов для изготовления как блочного, так и гранулированного пеносиликатного материала из тонкоизмельченного стекла являются:

- высокие энергозатраты при специальной варке стекла, которая осуществляется при 1400-1450°C;
- прямая зависимость производства пеностекла от объема техногенных и бытовых отходов стекла в случае их использования в качестве основного источника сырья. Незначительные объемы отходов стекла в большинстве регионов России не позволяют запускать данные производства;
- высокие энергозатраты, обусловленные высокой температурой вспенивания композиций на основании боя стекла и углеродистых газообразователей, которая, как правило, не ниже 850°C;

- отсутствие способов изготовления из одного состава сырьевой смеси как блочного, так и гранулированного пеноматериала.

Поэтому в настоящее время активно ведутся исследования по получению неорганического теплоизоляционного материала при низких температурах с использованием более дешевого и доступного сырья.

Известна сырьевая смесь для изготовления пеностекла, содержащая молотые стеклобой и газообразователь [2]. Данная сырьевая смесь дополнительно может содержать молотый кварцевый песок при следующем соотношении компонентов, мас. %: молотое стекло 84-94, газообразователь 1-3, кварцевый песок 5-13.

В составе сырьевой смеси для изготовления пеностекла могут быть использованы любые неорганические газообразователи, такие как мел, известняк, мрамор, антрацит, кокс и др. [3].

Существуют составы шихты для изготовления блочного пеносиликатного материала с использованием алюмосиликатных горных пород без их предварительного плавления в стекло, включающие, мас. %: нефелиновый сиенит – 5-15; бой тарного стекла – 45-55; гидрат оксида натрия – 7-9, вулканическое стекло – остальное [4]. В состав такой шихты не входит специальное газообразующее вещество. Вспенивание же массы происходит за счет паров воды, выделяющихся при высоких температурах путем конденсации химически связанной воды из группировок Si-OH. Последние образуются в природных алюмосиликатах при их механоактивации.

Авторами [5] разработана сырьевая смесь и способ получения гранулированного теплоизоляционного материала из жидкого стекла – стеклопора. Сырьевая смесь включает следующие компоненты: 93-95% жидкого стекла (плотностью 1,4-1,45 г/см<sup>3</sup>), 7-5% тонкодисперсного наполнителя с удельной поверхностью 2000-3000 см<sup>2</sup>/г (например, золы ТЭС) и 0,5-1% гидрофобизирующей добавки – кремнийорганической жидкости (например, ГКЖ-10). Сырьевая смесь, перемешанная до однородного состояния, подается в капельном виде в раствор хлористого кальция с температурой 22-30°C и выдерживается в течение 40 мин. для формирования гранул. Полученные сырьевые гранулы подсушиваются при 85-90°C в течение 10-20 мин. и затем вспучиваются при 350-500°C в течение 1-3 мин. [5]. Недостатком получаемого материала является низкая водостойкость.

Введение в состав шихты нитратов натрия или калия способствует интенсификации и оптимизации процесса вспенивания [6] за счет плавления и разложения этих солей с выделением кислорода при сравнительно небольших температурах, что позволяет достигать необходимого уровня поризации шихты при температуре 800±10°C.

В патенте [7] предлагается способ получения гранулята для производства пеностеклокристаллического материала, позволяющий использовать природное сырье вместо дефицитного стеклобоя. Технологический процесс не требует высоких температур, что делает производство экономически эффективным.

Осуществляется подготовка гранулята на основе термообработки смеси компонентов: а) сырьевых материалов с SiO<sub>2</sub> более 60 мас. %, например, цеолитовые туфы, маршаллиты, диатомиты, трепелы и т.п. и б) технологических добавок, обеспечивающих процессы силикатообразования без осуществления варки стекла.

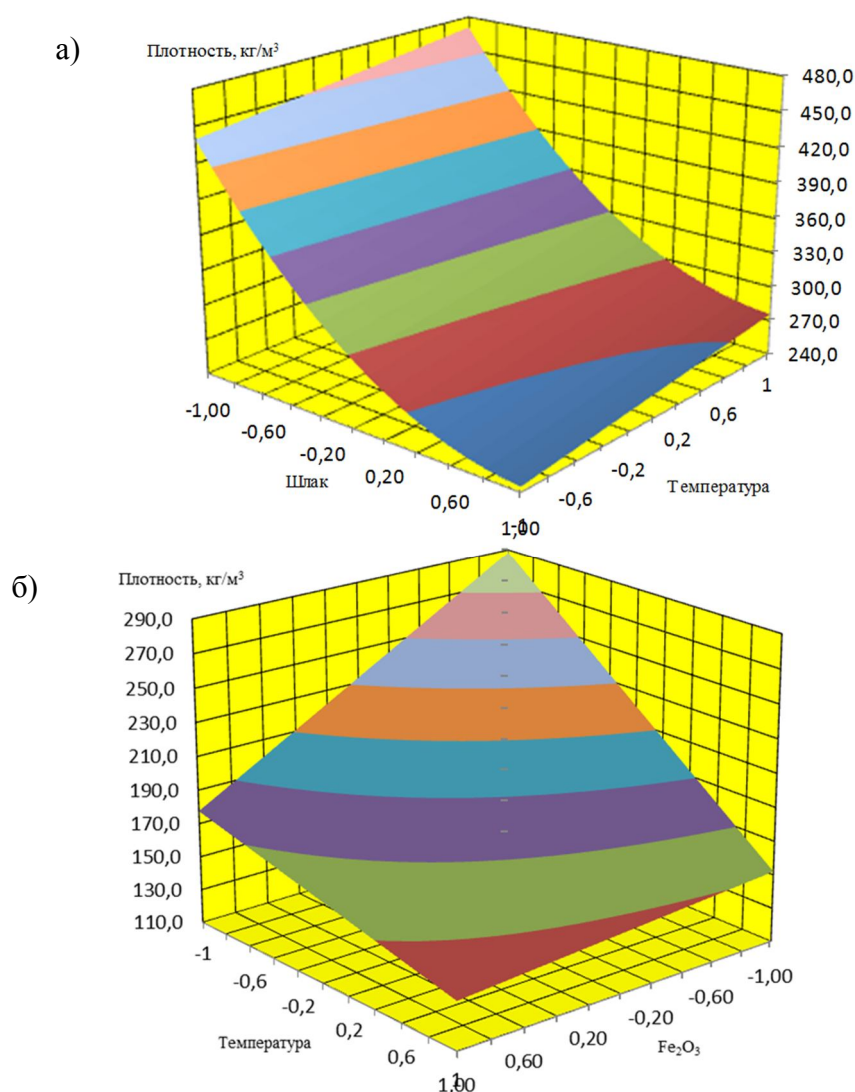
Разнообразие многотоннажных отходов промышленности по химическому и минералогическому составу, не уступающих добываемому сырью, а иногда по технологическим условиям и превосходящих его, делает перспективным использование их в качестве возобновляемых техногенных ресурсов. Поэтому ведутся разработки новых теплоизоляционных материалов на основе различных видов промышленных отходов.

Пористые стекломатериалы из нефелиновых шламов получают не только с насыпной плотностью 100-300 кг/м<sup>3</sup>, но и попутно добывают концентрат драгоценных металлов [8].

В основу изобретения [9] положена техническая задача использования при производстве пеностекла комплексного газообразователя – отхода сахарного производства (ОСП), сочетающего в себе свойства углеродосодержащих и карбонатных газообразователей, а также утилизации стеклобоя и ОСП. При этом снижается экологический ущерб, наносимый окружающей среде при хранении этих материалов в отвалах. Поставленная задача достигается тем,

что шихта для пеностекла, содержащая стеклобой и газообразователь, отличается введением комплексного газообразователя ОСП. Данный шихтовый состав позволяет осуществить утилизацию стеклобоя (тарного), отхода сахарного производства и получить качественный теплоизоляционно-акустический материал за счет введения комплексного газообразователя.

На кафедре химической технологии стекла и керамики Владимирского государственного университета с участием авторов ведутся разработки по получению высокоэффективной теплоизоляции с применением различных модифицирующих добавок, в том числе и промышленных отходов (отходов металлургического производства, шламов производства феррито-стронциевых магнитов, алюмотермического шлака, золы уноса ТЭС и др.). В ходе многолетних исследований предложены различные технические и технологические решения для производства пеноалюмосиликатного материала плотностью 110-500 кг/м<sup>3</sup>, коэффициентом теплопроводности 0,08-0,11 Вт/м·К и гидrolитическим классом от 2 до 4 [10-11]. На рисунке 1 представлены зависимости плотности получаемых материалов при введении различных промышленных отходов в шихту на основе зеленого тарного стеклобоя и графита в качестве порообразователя (значения концентраций отходов и температуры указаны в кодированных значениях).



**Рисунок 1 – Зависимость плотности образцов от: а – концентрации алюмотермического шлака и температуры вспенивания; б – концентрации металлургических отходов с высоким содержанием  $Fe_2O_3$  и температуры вспенивания**

Таким образом, в настоящее время в России ведется множество исследований по усовершенствованию составов и технологий получения теплоизоляционных пеноалюмосиликатных

материалов. В основном усовершенствование направлено на полную или частичную замену основных компонентов шихты на природное сырье (песок, магматические породы, диатомиты, трепелы и т.п.), либо на техногенные и бытовые отходы (нефелиновый шлак, мартеновский шлак, стеклобой и др.). Кроме этого в состав шихты вводятся различные модифицирующие добавки, которые позволяют снизить температуру получения материала и улучшить показатели основных свойств готовых изделий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидович, Б.К. Пеностекло [Текст] / Б.К. Демидович. – Минск: Наука и техника, 1975. – 248 с.
2. Дудеров, И.Г. Общая технология силикатов [Текст] / И.Г. Дудеров, Г.М. Матвеев, В.Б. Суханова. – М.: Стойиздат, 1987. – С. 529-531.
3. Пат. 2411200 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 03 С 11/00, С 03 В 19/08. Сырьевая смесь для изготовления пеностекла [Текст] / Ю.А. Щепочкина; заявитель и патентообладатель Ю.А. Щепочкина – №2009133710/03; заявл. 8.09.2009; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4. – 4 с.
4. Пат. 2164898 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 03С 11/00. Состав для получения пеностекла [Текст] / Д.Р. Дамдинова, А.Д. Цыремпилов, К.К. Константинова; заявитель и патентообладатель Восточно-Сибирский государственный технологический университет. – №99109233/03; заявл. 19.04.1999; опубл. 10.04.2001.
5. Пат. 2368574 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 03С 11/00. Сырьевая смесь для изготовления пеносиликата [Текст] / О.И. Лобов, А.А. Эпп, В.И. Иваненко, А.А. Филаретов. – №2008136712/12; заявл. 15.09.08; опубл. 27.09.2009, Бюл. № 27. – 8 с.: ил.
6. Пат. 2357933 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 03С 11/00. Шихта для получения пеностекла [Текст] / А.А. Архипов, В.А. Лотов, В.В. Власов. – № 2007118340/03; заявл. 16.05.2007; опубл. 27.11.2008, Бюл. №16. – 10 с.
7. Пат. 2326841 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 03С 11/00. Способ получения гранулята для производства пеностекла и пеностеклокристаллических материалов [Текст] / А.Н. Абияка, В.И. Верещагин, О.В. Казьмина; заявитель и патентообладатель ООО «Сибирский силикатный центр», ГОУ ВПО Томский политехнический университет. – № 2006108607/03; заявл. 20.03.2006; опубл. 20.06.2008, Бюл. № 17. – 4 с.
8. Пат. 2146234 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 03С 11/00. Способ получения пористых стекломатериалов из нефелиновых шламов [Текст] / В.Ф. Павлов, А.М. Погодаев, А.В. Прошкин, В.И. Моисеенко, А.Ф. Симурин, В.Ф. Шабанов; патентообладатель Павлов В.Ф. – №97115688/03; заявл. 23.09.1997; опубл. 10.03.2000.
9. Пат. 2291125 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 03С 11/00. Шихта для получения пеностекла [Текст] / Е.В. Баранов, Т.И. Шелковникова, А.М. Гавриленков, И.Н. Матющенко, А.А. Желтухина, Е.Ю. Никулина; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. – №2004138531/03; заявл. 28.12.2004; опубл. 10.01.2007, Бюл. №1. – 4 с.
10. Канаев, А.Ю. Регулирование структуры пеносиликатов, получаемых из отходов промышленных предприятий [Текст] // XII Всеукраїнська студентська наукова конференція: Актуальні проблеми природничих та гуманітарних наук у дослідженнях студентської молоді «Родзинка – 2010». – Черкаси: Вид. від. ЧНУ імені Богдана Хмельницького, 2010. – С. 33-37.
11. Канаев, А.Ю. Влияние температуры вспенивания на свойства пеностекла при использовании смеси газообразователей [Текст] / А.Ю. Канаев, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // Строительная наука 2010: Материалы международной научно-технической конференции. – Влад. гос. ун-т. Владимир, 2010. – С. 174-176.

### Канаев Андрей Юрьевич

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Владимир  
Аспирант кафедры «Химическая технология стекла и керамики»  
Тел.: +7 (960) 724-80-83  
E-mail: kanaev.aj@gmail.com

### 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

### 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

A.Y. KANAEV, I.A. KHRISTOFOROVA, A.I. KHRISTOFOROV

## HEAT-INSULATING FOAM ALUMINOSILICATES

*Results of present-day investigations of improvement composition and technology of obtaining heat-insulating foam aluminosilicate materials is presented. By obtaining this materials in the capacity of main raw materials were used natural and anthropogenic resources and different modifying agents, which made it possible to obtain wares with improved properties by reducing expenditure of energy for production.*

**Keywords:** heat insulation, foam aluminosilicate, modifiers, anthropogenic waste.

### BIBLIOGRAPHY

1. Demidovich, B.K. Penosteklo [Tekst] / B.K. Demidovich. – Minsk: Nauka i tehnika, 1975. – 248 s.
2. Duderov, I.G. Obshhaya tehnologiya silikatov [Tekst] / I.G. Duderov, G.M. Matveev, V.B. Suhanova. – M.: Stojizdat, 1987. – S. 529-531.
3. Pat. 2411200 Rossijskaja Federacija, MPK7 C 03 C 11/00, C 03 B 19/08. Syr'evaja smes' dlja izgotovlenija penostekla [Tekst] / Ju.A. Shhepochkina; zajavitel' i patentoobladatel' Ju.A. Shhepochkina – №2009133710/03; zajavl. 8.09.2009; opubl. 10.02.2011, Bjul. № 4. – 4 s.
4. Pat. 2164898 Rossijskaja Federacija, MPK7 S 03S 11/00. Sostav dlja poluchenija penostekla [Tekst] / D.R. Damdinova, A.D. Cyrempilov, K.K. Konstantinova; zajavitel' i patentoobladatel' Vostochno-Sibirskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet. – №99109233/03; zajavl. 19.04.1999; opubl. 10.04.2001.
5. Pat. 2368574 Rossijskaja Federacija, MPK7 S 03S 11/00. Syr'evaja smes' dlja izgotovlenija penosilikata [Tekst] / O.I. Lobov, A.A. Jepp, V.I. Ivanenko, A.A. Filaretov. – №2008136712/12; zajavl. 15.09.08; opubl. 27.09.2009, Bjul. № 27. – 8 s.: il.
6. Pat. 2357933 Rossijskaja Federacija, MPK7 S 03S 11/00. Shihta dlja poluchenija penostekla [Tekst] / A.A. Arhipov, V.A. Lotov, V.V. Vlasov. – № 2007118340/03; zajavl. 16.05.2007; opubl. 27.11.2008, Bjul. №16. – 10 s.
7. Pat. 2326841 Rossijskaja Federacija, MPK7 S 03S 11/00. Sposob poluchenija granuljata dlja proizvodstva penostekla i penosteklokristallicheskih materialov [Tekst] / A.N. Abijaka, V.I. Vereshhagin, O.V. Kaz'mina; zajavitel' i patentoobladatel' OOO «Sibirskij silikatnyj centr», GOU VPO Tomskij politehnicheskij universitet. – № 2006108607/03; zajavl. 20.03.2006; opubl. 20.06.2008, Bjul. № 17. – 4 s.
8. Pat. 2146234 Rossijskaja Federacija, MPK7 S 03S 11/00. Sposob poluchenija poristyh steklomaterialov iz nefelinovyh shlamov [Tekst] / V.F. Pavlov, A.M. Pogodaev, A.V. Proshkin, V.I. Moiseenko, A.F. Simurin, V.F. Shabanov; patentoobladatel' Pavlov V.F. – №97115688/03; zajavl. 23.09.1997; opubl. 10.03.2000.
9. Pat. 2291125 Rossijskaja Federacija, MPK7 S 03S 11/00. Shihta dlja poluchenija penostekla [Tekst] / E.V. Baranov, T.I. Shelkovnikova, A.M. Gavrilencov, I.N. Matjushhenko, A.A. Zheltuhina, E.Ju. Nikulina; zajavitel' i patentoobladatel' GOU VPO Voronezhskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet. – №2004138531/03; zajavl. 28.12.2004; opubl. 10.01.2007, Bjul. №1. – 4 s.
10. Kanaev, A.Ju. Regulirovanie struktury penosilikatov, poluchaemyh iz othodov promyshlennyh predpriyatij [Tekst] // XII Vseukraïns'ka students'ka naukova konferencija: Aktual'ni problemi prirodnichih ta humanitarnih nauk u doslidzhennjah students'koï molodi «Rodzinka – 2010». – Cherkasi: Vid. vid. ChNU imeni Bogdana Hmel'nic'kogo, 2010. – S. 33-37.
11. Kanaev, A.Ju. Vlijanie temperatury vspenivaniya na svoystva penostekla pri ispol'zovanii smesi gazoobrazovatelej [Tekst] / A.Ju. Kanaev, I.A. Hristoforova, A.I. Hristoforov // Stroitel'naja nauka 2010: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. – Vlad. gos. un-t. Vladimir, 2010. – S. 174-176.

#### Kanaev Andrey Yurevich

Vladimir state university of A.G. and N.G. Stoletovyh, Vladimir  
Post-graduate student of department «Chemical technology of glass and ceramics»  
Phone: +7 (960) 724-80-83  
E-mail: kanaev.aj@gmail.com

#### 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

#### 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



СОЛОМЕНЦЕВ А.Б.

## АДГЕЗИОННЫЕ ДОБАВКИ ДЛЯ ДОРОЖНЫХ БИТУМОВ И АСФАЛЬТОБЕТОНОВ И ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

*Приведен обзор методов оценки прочности сцепления поверхности минерального материала с битумом. Приведен перечень и основные свойства адгезионных добавок, которые предлагаются в настоящее время на российском рынке. Приведены результаты определения сцепления гранитного минерального материала с битумом при различном количестве добавок в нем. Предложена классификация добавок по эффективности действия.*

**Ключевые слова:** адгезия, сцепление между минеральным материалом и битумом, адгезионные добавки, азотсодержащие адгезионные добавки, оценка сцепления.

Адгезия – это связь между приведенными в контакт разнородными поверхностями. Адгезию (сцепление) битума с поверхностью минерального материала можно рассматривать как физико-химическое явление на границе контакта «битумная пленка – поверхность минерального материала», благодаря которому обеспечивается прилипание битумной пленки к минеральной поверхности. Адгезионные добавки применяются для улучшения сцепления минеральных материалов с органическими вяжущими. Для дорожных битумов и асфальтобетонов очень важно обеспечить максимально возможное сцепление между минеральными материалами (песком, щебнем) и битумом, чтобы асфальтобетон мог противостоять отслаивающему и разрушающему действию воды в сочетании с динамическими и атмосферными воздействиями.

Для оценки прочности сцепления поверхности минерального материала с битумом используются разнообразные способы [1]:

1. Испытание на способность отдельных приклеенных битумом щебенков удерживаться на наклонной поверхности после выдерживания в воде.
2. Испытание погружением в воду, и оценивание состояния обволакивания покрытых вяжущим минеральных зерен после выдерживания в воде в статических условиях, при динамической нагрузке, в условиях химической или термической нагрузки.
3. Испытание на износ с имитацией транспортной нагрузки погруженных в воду асфальтобетонных образцов.
4. Механические испытания после выдерживания в воде.
5. Стендовые испытания на модельных асфальтобетонных покрытиях или участках дорожного покрытия при движении колеса испытательной дорожки.

В настоящее время в России оценка сцепления минеральных материалов с органическими вяжущими может производиться в соответствии с ГОСТ 11508-74 (для вязких и жидких дорожных битумов) [2], ГОСТ Р 52128-2003 (для эмульсий битумных дорожных) [3] и ГОСТ 12801-98 (определение сцепления вяжущего с поверхностью щебня) [4]. Украина использует национальный стандарт ДСТУ Б В. 2.7-81-98 [5] для определения сцепления битумов нефтяных дорожных вязких с поверхностью стекла или каменного материала. В Республике Беларусь определяют коэффициент сцепления битума с гранитным щебнем в соответствии с СТБ 1062-97 [6]. В Евросоюзе и США используется метод «испытания на отслаивание кипячением в воде» [7, 8]. Показатель адгезии определяется по степени покрытия битумом обработанного вяжущим каменного материала после его погружения в кипяченую воду при заданных условиях. В Евросоюзе также используется метод «испытания на перекачивание в бутылке» [9, 10]. Покрытый битумом однородный по размеру каменный материал помещается в наполненную водой бутылку. Бутылка закупоривается и помещается в приспособление для перекачивания бутылок. Перекачивание бутылок выполняется при температуре окружающей среды и на заданной скорости. Через равные промежутки времени производится визуальная оценка степени покрытия минерального материала битумом.

Количественную оценку сцепления битума с поверхностью минерального материала можно получить используя методы, описанные в [5, 6, 11, 12]. Визуальная оценка степени покрытия поверхности минерального материала используется в [2, 3, 4, 7, 8, 9, 10].

Дорожным строителям уже на этапе выбора исходных минеральных материалов для асфальтобетонных смесей требуется произвести оценку сцепления их поверхности с битумом, определить какие добавки могли бы улучшить сцепление битума и в какой степени. Адгезионные добавки используются в асфальтобетонных смесях, применяемых для устройства верхних слоев покрытий на автомобильных дорогах и городских улицах и дорогах.

Для оценки сцепления битума с минеральными материалами, а также для изучения эффективности действия различных адгезионных добавок был выбран метод А («пассивное» сцепление) из ГОСТ 11508-74, согласно которому сцепление дорожных битумов с мрамором и песком определяется после 30 минут выдерживания в небурно кипящей дистиллированной воде частиц минеральных материалов, покрытых битумом, путем сравнения их с контрольными образцами №1, №2 и №3. Для соответствия контрольному образцу №3 менее  $\frac{3}{4}$  поверхности минерального материала должно быть покрыто битумной пленкой. Для соответствия контрольному образцу №2 более  $\frac{3}{4}$  поверхности должно остаться покрытой битумом после кипячения. Для соответствия контрольному образцу №1 битумная пленка должна полностью сохраняться на поверхности минерального материала после кипячения.

В настоящее время для устройства верхних слоев асфальтобетонных покрытий используются в большинстве случаев минеральные материалы из кислых горных пород, а природный песок не используется. Поэтому в качестве минерального материала был выбран гранитный материал фракции 2-5 мм ОАО «Павловскгранит» Воронежской области, который относится к кислым горным породам и имеет следующий минералогический состав: полевые шпаты – 55%, кварц – 15-39%, биотит плюс хлорит – 10-15%. После испытания кипячением вязкий битум, как правило, полностью отслаивается от гранитного материала ОАО «Павловскгранит», поэтому эффект действия адгезионных добавок для улучшения сцепления с кислыми горными породами достоверно можно проследить, используя именно вышеназванный минеральный материал. В качестве дорожного битума использовался нефтяной вязкий дорожный битум БНД 60/90 Московского нефтеперерабатывающего завода.

В работе [13] определено влияние азотсодержащих адгезионных добавок на свойства асфальтобетона, приведены свойства добавок и битума с добавками. За прошедшие десять лет ассортимент предлагаемых производителями адгезионных добавок значительно расширился. Кроме азотсодержащих появились добавки на основе полимеров, фосфорсодержащих соединений с полифункциональными свойствами. Перечень адгезионных добавок\*, которые представлены в настоящее время на российском рынке, и их основные свойства приведены в таблице 1.

Под адгезионными азотсодержащими добавками подразумеваются добавки, улучшающие сцепление битума с кислыми горными породами, которые содержат азотсодержащие ПАВ, проявляющие катионактивные свойства: амиды, амины, диамины, полиамины, четвертичные аммониевые соединения и их производные, а также смеси этих соединений. К ним относятся добавки «Сондор А», «Амдор-10», «Wetwfix BE», «БП-КСП», «Адгезол», добавка «CECABASE RT 945» кроме имидазолинов содержит полимерный компонент и т.д. Введение адгезионной азотсодержащей добавки в битум изменяет растворяющую способность углеводородной дисперсионной среды битумной дисперсной системы. Молекулы и мицеллы азотсодержащих ПАВ частично адсорбируются на поверхности дисперсных битумных частиц (асфальтенов и их ассоциатов), частично находятся в углеводородной дисперсионной среде. При распределении битума по поверхности гранитных минеральных частиц при температуре 140°C молекулы и мицеллы ПАВ, находящиеся в углеводородной дисперсионной среде, мигрируют к поверхности раздела и образуют двойной электрический слой. Под влиянием поверхностных сил минеральной поверхности структура граничного слоя видоизменяется с образованием ориентированного слоя [14]. Битумная пленка на минеральных частицах имеет непостоянную величину. На участках углублений и шероховатости толщина больше, на углах частиц пленка утончается.

\* Сведения о добавках взяты из нормативных документов, устанавливающих требования к свойствам добавок.

**Таблица 1 – Свойства адгезионных добавок**

№ п/п	Наименование добавок	Свойства добавок							
		Внешний вид, цвет при 20°C	Температура плавления, °C	Растворимость	Плотность при 20°C, кг/м <sup>3</sup>	Щебеночное число, мг КОН/г	Кислотное число, мг КОН/г	Температура вспышки, °C не ниже	Температура воспламенения, °C
1	Сондор марка А	маслянистая жидкость от желтого до темно-коричневого цвета	15	маслорастворимая	990	400-600	-	200	290
2	Амдор-10	вязкая жидкость светло-желтого цвета	меньше минус 3	маслорастворимая	950	400-600	не более 15	145	255
3	Wetwfix BE	коричневая вязкая жидкость	меньше минус 20	водомаслорастворимая	980	-	меньше 10	больше 100	больше 218
4	СЕСА-BASE RT 945	жидкость желтого цвета	минус 10	маслорастворимая	1000	щелочность по перхлору 4,2-5,2	-	больше 100	-
5	БП-КСП	мазеообразный продукт коричневого цвета	45	-//-	970	-	-	160	255
6	Техпро-гресс-1	вязкая жидкость коричневого цвета	15	маслорастворимая	1000	-	-	190	280
7	ДАД-1	паста коричневого цвета	40	-//-	940	-	-	224	303
8	БАП-ДС-3 марка В	вязкая жидкость от светло-желтого до темно-коричневого цвета	10	водомаслорастворимая	965-990	-	не более 30	150	240
9	Адгезол	паста коричневого цвета	60	маслорастворимая	980	-	-	160	255
10	Дорос-АП	вязкая жидкость от желтого до темно-коричневого цвета	10	маслорастворимая	-	-	не более 20	166	187
11	МБПГ-75	твердая масса черного цвета	80	-//-	1050	-	-	240	320
12	БАГ	паста коричневого цвета	80	маслорастворимая	980	80	50	-	-
13	Афтисотдор	вязкая жидкость от темно-коричневого до черного цвета	-	маслорастворимая	-	-	190-235	210	247

Добавка «Техпрогресс-1» является полимерной добавкой на основе низкомолекулярного полиизобутилена с молекулярной массой 10 000 с привитым малеиновым ангидридом. Добавка «МБПГ-75» представляет собой битумный материал с добавкой фосфорсодержащих соединений.

Из таблицы видно, что добавки имеют различную температуру плавления (от минус 20°C у «Wetwfix BE» до плюс 80°C у «МБПГ-75»). Добавки являются маслорастворимыми, кроме «Wetwfix BE» и «БАП-ДС-3», которые водомаслорастворимы. Плотность добавок изменяется в пределах от 965 до 1050 кг/м<sup>3</sup>. Температура вспышки находится в пределах от 100 до 240°C, температура воспламенения – в пределах от 187 до 320°C.

В таблице 2 приведены результаты определения сцепления гранитного минерального материала с битумом при различном количестве добавок в нем. При определении показателя сцепления гранитного минерального материала с битумом без добавок наблюдалось почти полное отслаивание битума от поверхности минерального материала после кипячения, хотя формально битумо-минеральная смесь выдержала испытание по контрольному образцу №3 (менее ¾ поверхности покрыто битумом). Для более точной характеристики сцепления в таблице 2 введены промежуточные значения 3 → 2, 2 → 1 (3 ближе к 2, 2 ближе к 1). Это означает, что сцепление соответствует образцу №3, но ближе к образцу №2 или соответствует образцу №2, но ближе к образцу №1.

Таблица 2 – Сцепление дорожного битума с гранитным минеральным материалом

№ п/п	Наименование добавки	Показатель сцепления, выдерживает по образцу №, при расходе добавок в % от массы битума								
		0,3	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
1	Сондор марка А	3 → 2	2 → 1	2 → 1	1	2 → 1	2 → 1	2 → 1	3	3
2	Амдор-10	3	3	2 → 1	1	2 → 1	2	2	3	3 → 2
3	Wetwfix BE	3	3 → 2	2	1	2 → 1	2	2 → 1	3	3
4	SECABASE RT 945	3	2 → 1	3	2 → 1	2 → 1	2	2 → 1	3 → 2	2 → 1
5	БП-КСП	3	2 → 1	2 → 1	1	2 → 1	2	2	3 → 2	3 → 2
6	Техпрогресс-1	3	3 → 2	2 → 1	1	2 → 1	2 → 1	2	3	3
7	Дорос-АП	3	3 → 2	3 → 2	2 → 1	1	2	3	3	3
8	БАП-ДС-3 марка В	3	3	3	2	2	2	2	3	3
9	Адгезол	3	3	3	3 → 2	2	2	2	2	3
10	ДАД-1	3	3	3	3 → 2	2	2	2	2	3
11	МБПГ-75	3	3	2	2	2 → 1	2 → 1	2 → 1	1	1
12	БАГ	3	3	3	3	3	3	3	3	3
13	Афтисотдор	3	3 → 2	3	3 → 2	3	3	3	3	3

Анализ данных таблицы 2 позволил выделить три группы адгезионных добавок по эффективности. Для высокоэффективных добавок первой группы «Сондор» марка А, «Амдор-10», «Wetwfix BE», «SECABASE RT 945», «БП-КСП», «Техпрогресс-1», «Дорос-АП» при расходе добавок от 0,8-до 1,0% достигается сцепление по образцу №1. Для добавок средней эффективности второй группы «БАП-ДС-3» марка В, «Адгезол», «ДАД-1» при расходе добавок от 1,0 до 2,0% и более от массы битума достигается сцепление по образцу №2, а для «МБПГ-75» при расходе от 1,5 до 3,5% достигается сцепление по образцу №2 → 1 до №1. Для малоэффективных добавок третьей группы «БАГ», «Афтисотдор» при всех расходах добавок сцепление имеет показатель по образцу №3 или №3 → 2. Таким образом, можно дополнить классификацию адгезионных добавок [15] тремя группами по эффективности: высокоэффективные, средней эффективности и малоэффективные.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адгезия [Текст]: Adhasives Verhalten: [пер. с нем.] / Bitumen, 1970, Bd. 32, №8, s. 212-215, Всесоюзный центр переводов научно-технической литературы и документации. – М. – 1976. – 16 с.
2. ГОСТ 11508-74. Битумы нефтяные. Методы определения сцепления битума с мрамором и песком [Текст]. – Введ. 01.01.75. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 7 с.
3. ГОСТ Р 52128-2003. Эмульсии битумные дорожные. Технические условия [Текст]. – Введ. 2003-10-01. – М.: Госстрой России: ФГУП ЦПП, 2004. – 25 с.
4. ГОСТ 12801-98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний [Текст]. – Введ. 01.01.1999. – М.: Госстрой России: ГУП ЦПП, 1999. – 54 с.
5. ГОСТ Украины ДСТУ Б.В. 2.7-81-98. Строительные материалы. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения показателя сцепления с поверхностью стекла и каменных материалов [Текст]. – Введ. 1999-03-01. – Киев: Госстрой Украины, 1999. – 7 с.
6. ГОСТ Республики Беларусь СТБ 1062-97. Битумы нефтяные для верхнего слоя дорожного покрытия. Технические условия. [Текст]. – Введ. 1997-05-03. – Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 1997. – 15 с.
7. Европейский стандарт EN 12697-11: Часть С, Испытания на отслаивание кипячением в воде.
8. США: ASTM Д 3625-91, Действие воды на покрытый битумным вяжущим каменный материал с использованием кипящей воды.
9. Европейский стандарт EN 12697-11: Часть А, Метод перекачивания в бутылке.
10. Стандарт компании «Акзо Нобель»: АА1, Испытание на перекачивание в бутылке.
11. Колбановская, А.С. Метод красителя для определения сцепления битума с минеральными материалами [Текст] / А.С. Колбановская. – М.: Автотрансиздат, 1959. – 32 с.
12. Худякова, Т.С. Количественная оценка сцепления дорожных битумов с минеральным материалом [Текст] / Т.С. Худякова, Д.А. Розенталь, И.А. Машкова, А.В. Березников // Химия и технология топлив и масел, 1987. – №6. – С. 35-36.
13. Соломенцев, А.Б. Использование азотсодержащих адгезионных ПАВ в органических вяжущих и в асфальтобетоне [Текст] / А.Б. Соломенцев // Наука и техника в дорожной отрасли, 2002. – №2. – С. 24-56.

14. Королев, И.В. О битумной пленке на минеральных зернах асфальтобетона [Текст] / И.В. Королев // Автомобильные дороги, 1981. – №7. – С. 23-24.

15. Соломенцев, А.Б. Классификация и номенклатура модифицирующих добавок для битумов [Текст] / А.Б. Соломенцев // Наука и техника в дорожной отрасли, 2008. – №1. – С. 14-16.

**Соломенцев Александр Борисович**

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

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство автомобильных дорог»

Тел.: +7 (4862) 73-43-67

A.B. SOLOMENTSEV

**BONDING ADDITIVES FOR BITUMEN  
AND ASPHALT-CONCRETE ROAD COVERS  
AND EVALUATION OF THEIR EFFECTIVENESS**

*The paper presents an overview of methods for assessing the bounding strength of mineral material and bitumen. Authors offer a list of the basic properties of the adhesive additives which are used at the present time in Russia. The paper gives the results of the determination of bounding force of granite mineral material with bitumen at various amounts of additives. Classification of additives by their effectiveness is also presented.*

**Keywords:** *adhesion, adhesion between the mineral material and bitumen, adhesive additives, nitrogen-containing adhesive additives, assessment of bounding strength.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Adgezija [Текст]: Adhasives Verhalten: [per. s nem.] / Bitumen, 1970, Bd. 32, №8, s. 212-215, Vsesojuznyj centr perevodov nauchno-tehnicheskoy literatury i dokumentacii. – M. – 1976. – 16 s.
2. GOST 11508-74. Bitumy nefjtjanye. Metody opredelenija sceplenija bituma s mramorom i peskom [Текст]. – Vved. 01.01.75. – M.: Izdatel'stvo standartov, 1985. – 7 s.
3. GOST R 52128-2003. Jemul'sii bitumnye dorozhnye. Tehnicheskie uslovija [Текст]. – Vved. 2003-10-01. – M.: Gosstroj Rossii: FGUP CPP, 2004. – 25 s.
4. GOST 12801-98. Materialy na osnove organicheskikh vjazhushhih dlja dorozhnogo i ajerodromnogo stroitel'stva. Metody ispytanij [Текст]. – Vved. 01.01.1999. – M.: Gosstroj Rossii: GUP CPP, 1999. – 54 s.
5. GOST Ukrainy DSTU B.V. 2.7-81-98. Stroitel'nye materialy. Bitumy nefjtjanye dorozhnye vjazkie. Metod opredelenija pokazatelja sceplenija s poverhnost'ju stekla i kamennyh materialov [Текст]. – Vved. 1999-03-01. – Kiev: Gosstroj Ukrainy, 1999. – 7 s.
6. GOST Respubliki Belarus' STB 1062-97. Bitumy nefjtjanye dlja verhnego sloja dorozhnogo pokrytija. Tehnicheskie uslovija. [Текст]. – Vved. 1997-05-03. – Minsk: Ministrojarhitektury Respubliki Belarus', 1997. – 15 s.
7. Evropejskij standart EN 12697-11: Chast' S, Ispytanija na otslaivanie kipjacheniem v vode.
8. SSHA: ASTM D 3625-91, Dejstvie vody na pokrytyj bitumnym vjazhushhim kamennyj material s ispol'zovaniem kipjashhej vody.
9. Evropejskij standart EN 12697-11: Chast' A, Metod perekatyvanija v butylke.
10. Standart kompanii «Akzo Nobel»: AA1, Ispytanie na perekatyvanie v butylke.
11. Kolbanovskaja, A.S. Metod krasitelej dlja opredelenija sceplenija bituma s mineral'nymi materialami [Текст] / A.S. Kolbanovskaja. – M.: Avtotransizdat, 1959. – 32 s.
12. Hudjakova, T.S. Kolichestvennaja ocenka sceplenija dorozhnyh bitumov s mineral'nyh materialom [Текст] / T.S. Hudjakova, D.A. Rozental', I.A. Mashkova, A.V. Bereznikov // Himija i tehnologija topliv i masel, 1987. – №6. – С. 35-36.
13. Solomencev, A.B. Ispol'zovanie azotsoderzhashhih adgezionnyh PAV v organicheskikh vjazhushhih i v asfal'tobetone [Текст] / A.B. Solomencev // Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli, 2002. – №2. – С. 24-56.
14. Korolev, I.V. O bitumnoj plenke na mineral'nyh zernah asfal'tobetona [Текст] / I.V. Korolev // Avtomobil'nye dorogi, 1981. – №7. – С. 23-24.
15. Solomencev, A.B. Klassifikacija i nomenklatura modifizirujushhih dobavok dlja bitumov [Текст] / A.B. Solomencev // Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli, 2008. – №1. – С. 14-16.

**Solomentsev Alexandr Borisovich**

State university – educational-science-production complex, Orel

Candidate of technical science, associate professor of department «Building of highways»

Ph.: +7 (4862) 73-43-67

ФЕДОСОВА Н.Л., РУМЯНЦЕВА В.Е., ШЕСТЕРКИН М.Е.,  
МАНОХИНА Ю.В.

## О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАССОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССАХ КОРРОЗИИ ПЕРВОГО ВИДА БЕТОНА В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ «РЕЗЕРВУАР-ЖИДКОСТЬ»

*В работе показано, что основным компонентом, определяющим массоперенос в системе «бетонная конструкция, ограждающая конструкция – жидкая среда», является гидроксид кальция. Отмечено, что равновесие в системе «твердое – жидкость» характеризуется изотермами сорбции-десорбции. Проанализирована линейная зависимость равновесной концентрации в твердой фазе от концентрации в жидкой фазе, подчиняющаяся закону Генри. Представлена математическая модель массопереноса при жидкостной коррозии бетона первого вида, приведено решение системы уравнений методом интегральных преобразований Лапласа. Некоторые результаты расчетов по полученным выражениям представлены в графическом виде – изменение концентрации переносимого компонента в твердой и жидкой фазах и среднее по толщине конструкции, что дает возможность прогнозировать динамику и кинетику исследуемых процессов коррозионной деструкции.*

**Ключевые слова:** коррозия, цементный бетон, жидкая водная среда, диффузия, изотермы сорбции-десорбции, массоперенос, долговечность, закон Генри, математическое моделирование.

Общеизвестно [1, 2], что гидроксид кальция является основным компонентом, определяющим массоперенос в системе «бетонная конструкция, ограждающая конструкция – жидкая среда». Причем это взаимодействие характерно как для резервуаров хранения жидкостей, так и конструкций многочисленных гидротехнических сооружений. Уменьшение содержания гидроксида кальция в результате «вымывания» его из бетона жидкостью вызывает изменение фазового и термодинамического равновесия в системе, приводит к разложению основных составляющих цементного клинкера, таких как полугидрат сульфата кальция, гипс, трехкальциевый алюминат, алит, белит, гиллебрандит, ксонотлит, тоберморит, что в свою очередь приводит к необратимой потере прочностных свойств бетона.

Поэтому вопросы изучения кинетики и динамики массопереноса гидроксида кальция в жидкую фазу по своей сути и есть вопросы прогнозирования долговечности бетонов.

Ранее [3-5] нами в соавторстве с академиком РААСН С.В. Федосовым было показано, что массоперенос в системе «резервуар – жидкость» определяется краевой задачей массопроводности вида:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \cdot \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, 0 \leq x \leq \delta. \quad (1)$$

$$\text{Начальные условия: } C(x, \tau)|_{\tau=0} = C(x, 0). \quad (2)$$

$$\text{Граничные условия: } \frac{\partial C(0, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Здесь  $C(x, \tau)$  – концентрация  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в бетоне в момент времени  $\tau$  в произвольной точке с координатой  $x$  в пересчете на  $\text{CaO}$ , кг  $\text{CaO}/\text{кг}$  бетона;  $C_p(\tau)$  – равновесная концентрация на поверхности твердого тела, кг  $\text{CaO}/\text{кг}$  бетона;  $k$  – коэффициент массопроводности в твердой фазе,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\delta$  – толщина стенки конструкции, м;  $x$  – координата, м;  $\tau$  – время, с;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с.

$$k \cdot \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = \beta [C_p(\tau) - C(\delta, \tau)]. \quad (4)$$

Согласно закону сохранения масс, поток массы вещества, выходящего с поверхности бетона, должен быть равен количеству вещества, прибывающему в жидкую фазу [3]:

$$-S \cdot \rho_b \cdot k \cdot \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = V_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot \frac{\partial C_{ж}(\tau)}{\partial \tau}. \quad (5)$$

Здесь левая часть – количество переносимого компонента через внутреннюю поверхность резервуара  $S$ ,  $m^2$ ; правая часть – приращение массы компонента в объеме  $V_{ж}$  резервуара,  $m^3$ ;  $\rho_b, \rho_{ж}$  – плотности бетона и жидкости соответственно,  $kg/m^3$ . Знак «–» указывает на уменьшение концентрации компонента в бетоне.

Уравнение (1) является классической записью параболического дифференциального уравнения массопроводности (диффузии в твердом теле). Выражение (2) – начальное условие задачи, показывающее, что в начальный момент взаимодействия жидкости и бетона (например, начало заливки резервуара) концентрация «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонной конструкции равномерна. Граничное условие (3) относится к внешней границе конструкции и называется «условием непроницаемости», показывая, что через наружную поверхность бетона переносимый компонент не уходит. Граничное условие (4) характеризует условие массопереноса через границу раздела фаз «твердое – жидкость». Изнутри к поверхности тела целевой компонент переносится посредством массопроводности, а от границы переносится в жидкость посредством массоотдачи естественной конвекцией в жидкой фазе. Дифференциальное уравнение (5) представляет собой материальный баланс переносимого компонента, так как его левая часть отражает значение плотности потока массы вещества, поступающего из внутренних слоев бетона к межфазной границе, а правая часть показывает количество вещества, поступающего в результате массопереноса в объем жидкости.

Впервые идея о возможности совместного рассмотрения массопереноса в замкнутой системе «твердое – жидкость» была высказана при исследовании процессов адсорбции профессором Ивановского химико-технологического института К.Н. Белоноговым в 60-х годах прошлого века и с его согласия опубликована профессором Львовского политехнического института Л.С. Аксельрудом в монографии [6]. Равновесие в системе «твердое – жидкость» изучается статикой процессов и характеризуется изотермами сорбции-десорбции [7]. Брунауэром [8] выделено пять основных типов изотерм сорбции-десорбции, основные из которых показаны на рисунке 1. Простейшей является так называемый «закон Генри» [7]:

$$C_p = mC_{ж}, \quad (6)$$

показывающий линейную зависимость равновесной концентрации в твердой фазе  $C_p$  от концентрации в жидкой фазе  $C_{ж}$ .

Тип кривой 2 характерен для микропористой твердой фазы, практически не содержащей мезопор. Мезопоры, поры размером от 2 до 50 нм по классификации IUPAC. Выделение этой области пор в отдельную группу основано на том, что именно в порах такого размера происходит и может быть измерена капиллярная конденсация (конденсация при парциальном давлении ниже давления насыщенного пара) [9]. Мезопоры могут содержать оксиды кремния, алюминия, алюмосиликаты и другие соединения, которые относят к высокоосновным составляющим цементных бетонов. Начальный выгнутый участок характерен для системы «твердое – жидкость», когда взаимодействие молекул между фазами меньше межмолекулярного взаимодействия для молекул воды, например, вызванного проявлением водородных связей. Профессор К.Н. Белоногов применил закон Генри и дал алгоритм решения задач подобного типа, которым успешно пользовались ученые для моделирования процессов десорбции и экстрагирования. На рисунке 2 кривая 1 иллюстрирует закон Генри, кривая 2 показывает реальную кривую равновесия для системы «бетон – вода». Очевидно, что в замкнутой системе, чем дольше идет процесс, и жидкость все более насыщается переносимым компонентом, интенсивность массопереноса все более снижается, а расхождения между линиями все более вырастает, а, следовательно, будет увеличивать

ся и ошибка расчетов, основанных на законе Генри. На рисунке 2 приведена реальная кривая равновесия и ряд касательных, ее моделирующих линейной зависимостью:

$$C_p = a_i + m_i C_{жс}. \quad (7)$$

Кривая 1 на этом рисунке – реальная кривая десорбции; линия 2 – это закон Генри ( $a_i = 0; m_i = m_1$ ); прямая 3 аппроксимирует поведение линии равновесия в зоне 2 ( $a_i = a_2; m_i = m_2$ ). Точка  $C_{жс}^*$  является своего рода критической (реперной) точкой, характеризующей переход из одной зоны в другую.

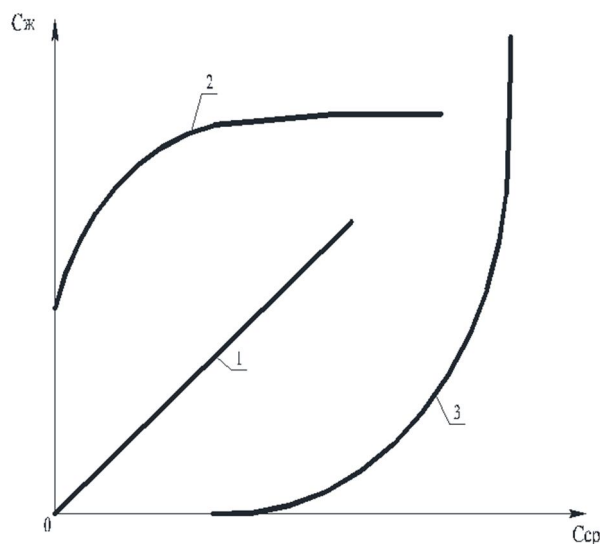


Рисунок 1 – Схематическое изображение изотерм десорбции: 1 – линейная; 2 – твердая фаза практически не содержит мезопор; 3 – низкий уровень взаимодействия молекул в системе «твердое – жидкость»

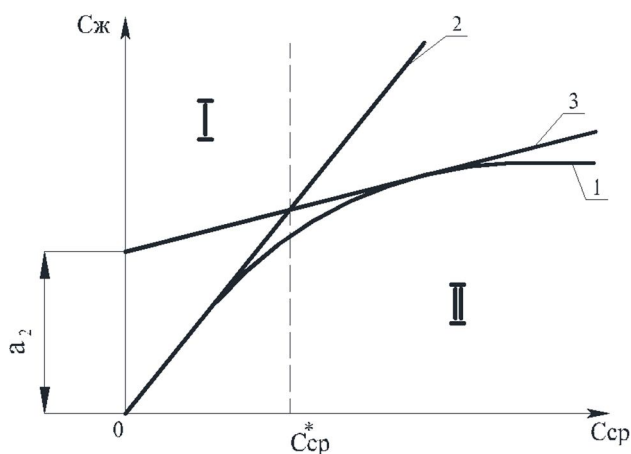


Рисунок 2 – Равновесие в системе «бетон – вода»: 1 – кривая десорбции,  $a = 0$ ; 2 – кривая, иллюстрирующая закон Гука,  $a_i = a_2$ ; 3 – аппроксимация линии равновесия в зоне II

Такой подход дает большую точность расчетов. При необходимости увеличения точности расчетов количество касательных может быть увеличено, не вызывая принципиальных сложностей в расчетах.

Принципиальным является следующий аспект: начальное условие (2) характеризует равномерное начальное распределение концентраций в момент времени, принимаемый за начало расчетов. К тому моменту, когда действие закона Генри закончится и концентрация переносимого компонента в жидкой фазе приблизится к величине  $C_{жс}^*$ , в расчет включается уравнение для зоны 2 ( $a_2; m_2$ ).



Введем в рассмотрение безразмерные переменные вида:

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{C_0 - C(x, \tau)}{C_0}, \quad \bar{x} = \frac{x}{\delta}, \quad Fo_m = \frac{k\tau}{\delta^2}. \quad (8)$$

С учетом этого кривая задача (1)-(4) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}, \quad Fo_m > 0, \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad Z(\bar{x}, 0) = 0; \quad (9)$$

$$\frac{1}{Bi_m} \cdot \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = [Z_p(Fo_m) - Z(1, Fo_m)]; \quad (10)$$

$$\frac{\partial Z(0, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = 0. \quad (11)$$

Здесь  $Bi_m = \beta \cdot \delta / k$  – массообменный критерий Био.

Обратимся к формуле (5) и преобразуем ее с учетом обозначений (8) и формулы (7):

$$\frac{S}{V} \cdot \frac{\rho_o}{\rho_{жс}} \cdot \frac{k}{\delta} \cdot \frac{\partial [C_o - C(\delta, \tau)]}{\partial x \cdot C_o} = - \frac{\partial Z' [C_o - (a_i + m_i C_{жс}(\tau))]}{m \partial \left( \frac{\tau}{\delta^2} \right) \cdot C_o \cdot \delta^2}. \quad (12)$$

Из формулы (12) следует безразмерный комплекс:

$$K_m = \frac{m \cdot S \cdot \delta}{V_{жс}} \cdot \frac{\rho_o}{\rho_{жс}} = \frac{m G_{\sigma}}{G_{жс}}, \quad (13)$$

где  $K_m$  – коэффициент, учитывающий характеристики фаз;  $G_B$  – масса бетонного резервуара, кг;  $G_{жс}$  – масса жидкости в резервуаре, кг.

И тогда окончательно (12) примет вид:

$$-\frac{\partial Z_{жс} Fo_m}{\partial Fo_m} = K_m \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial \bar{x}}. \quad (14)$$

При этом начальное условие (2) меняется на неравномерное распределенное:

$$C(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = C_o(x) \quad (15)$$

или в безразмерном виде:

$$Z_0(\bar{x}) = \frac{C_0 - C(x)}{C_0}. \quad (16)$$

В области изображений по Лапласу краевая задача (9)-(11) с начальным условием (9) и уравнением (14) принимает вид:

$$\frac{d^2 Z(\bar{x}, s)}{d\bar{x}^2} - sZ(\bar{x}, s) + Z_0(\bar{x}) = 0; \quad (17)$$

$$\frac{dZ(0, s)}{d\bar{x}} = 0; \quad (18)$$

$$\frac{1}{Bi_m} \cdot \frac{dZ(1, s)}{d\bar{x}} = [Z_{жс}(s) - Z(1, s)]; \quad (19)$$

$$\left[ \frac{1}{Bi_m} + \frac{K_m}{s} \right] \frac{dZ(1, s)}{d\bar{x}} = -Z(1, s) + \frac{Z_{жс}}{s}. \quad (20)$$

Решение искомой краевой задачи в области изображений представим в конечном виде, опуская длительную, но несложную процедуру поиска констант при решении обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка (17) с помощью граничных условий (18) и (19):

$$Z(\bar{x}, s) = \frac{ch(\sqrt{s}\bar{x})}{\sqrt{s}D} \left\{ (s + Bi_m K_m) \sqrt{s} ch \sqrt{s} + Bi_m s sh \sqrt{s} \right\} \times$$

$$\times \int_0^1 Z_0(\xi) ch(\sqrt{s}\xi) d\xi + \frac{Z_{ж}(0)Bi_m(ch\sqrt{s}\bar{x})}{D}, \quad (21)$$

$$\text{где } D' = \left\{ (s + Bi_m K_m) \sqrt{s} sh \sqrt{s} + Bi_m sch \sqrt{s} \right\}'. \quad (22)$$

Перевод изображения в область оригиналов осуществляется в соответствии со второй теоремой разложения [10], и оригинал имеет вид:

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \mu_n \cos(\mu_n \bar{x}) \psi(\mu_n, Bi_m, K_m) \int_0^1 z_0(\xi) \cos(\mu_n \xi) d\xi \exp(-\mu_n^2 Fo_m), \quad (23)$$

$$\text{где } \psi(\mu_n, Bi_m, K_m) = \frac{(\mu_n^2 - Bi_m K_m) \cos \mu_n + Bi_m \mu_n \sin \mu_n}{\sin \mu_n [3\mu_n^2 + Bi_m (\mu_n^2 - K_m)] + \cos \mu_n \mu_n Bi_m [\mu_n^2 - (Bi_m K_m + 2)]}. \quad (24)$$

Формула (23) позволяет рассчитывать динамику массопереноса в бетонной конструкции и изменение полей концентраций переносимого компонента.

При этом характеристическое уравнение для поиска корней  $\mu_n$  имеет вид:

$$tg \mu_n = \frac{\mu_n Bi_m}{\mu_n^2 - Bi_m K_m}. \quad (25)$$

Для того, чтобы получить уравнение кинетики изменения содержания гидроксида кальция в объеме жидкости возвратимся к уравнению (14). Из правой части уравнения (14) следует необходимость дифференцирования решения (23) по  $\bar{x}$  и определение производной при  $\bar{x} = 1$ .

Обратим внимание, что в выражении (23) только один сомножитель, а именно,  $\cos(\mu_n, \bar{x})$  содержит дифференцируемую величину  $\bar{x}$ . Следовательно:

$$\frac{d}{d\bar{x}} [\cos(\mu_n, \bar{x})] = -\frac{1}{\mu_n} \sin(\mu_n, \bar{x}). \quad (26)$$

И тогда решение (23) перепишется:

$$\frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sin \mu_n \psi(\mu_n, Bi_m, K_m) \int_0^1 Z_o(\xi) \cos(\mu_n \xi) \exp(-\mu_n^2 Fo_m) d\xi. \quad (27)$$

Обратимся вновь к уравнению (14). Интегрирование по  $Fo_m$  приводит к выражению:

$$\begin{aligned} Z_{ж}(Fo_m) &= Z_o(Fo_m) - K_m \int_0^{Fo_m} \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial \bar{x}} dFo_m = \\ &= Z_o(Fo_m) + 2K_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n} \sin \mu_n \psi(\mu_n, Bi_m, K_m) \int_0^1 Z_o(\xi) \cos(\mu_n \xi) d\xi [\exp(-\mu_n^2 Fo_m) - 1]. \end{aligned} \quad (28)$$

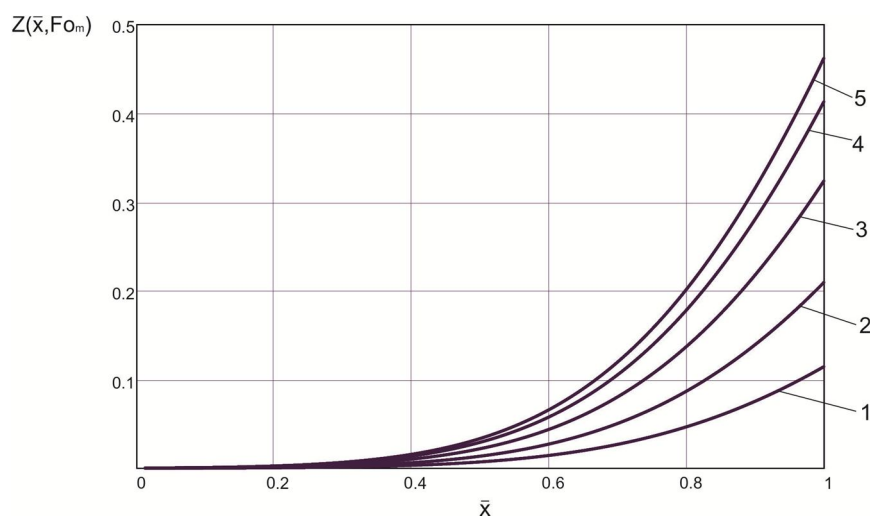
Если перейти к принятой концентрации жидкости через закон Генри, то решение (28) перепишется так:

$$\begin{aligned} Z_{ж}(Fo_m) &= \frac{C_o - (a_i + m_i C_{ж}(\tau))}{C_o} = \\ &= \frac{a}{C_o} Z_{ж}(0) + 2K_m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n} \sin \mu_n \psi(\mu_n, Bi_m, K_m) \int_0^1 Z_o(\xi) \cos(\mu_n \xi) d\xi [\exp(-\mu_n^2 Fo_m) - 1]. \end{aligned} \quad (29)$$

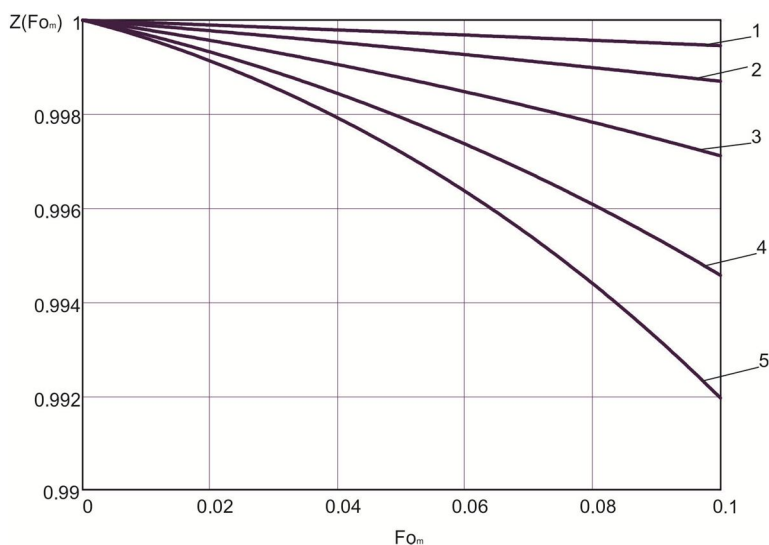
Итак, еще раз обратим внимание на то, что в области малых концентраций гидроксида кальция в жидкой фазе:  $0 < C_{ж}^* < C_{ж}^*$ ,  $a = 0$ , и расчеты по (29) соответствуют области закона Генри, а в зоне  $C_{ж} > C_{ж}^*$  — другой ветви изотермы десорбции. Заметим при этом, что вследствие того, что все параметры процесса (плотность потока массы вещества, коэффициенты массопроводности и массоотдачи) существенно меняются во времени процесса, предпочтительно в качестве алгоритма расчета использование метода «микропроцессов» [11], когда начальным распределением концентраций для следующего микропроцесса является конечное распределение концентраций в предыдущем «микропроцессе».

Расчеты по представленным математическим моделям проведены при следующих значениях основных величин:  $\delta = 0,03$  м;  $S = 0,9 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>;  $V = 2,7 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>;  $\rho_6 = 2393$  кг/м<sup>3</sup>;  $\tau = 70$  сут.;  $C_0 = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>;  $k = 4,5 \cdot 10^{-12}$  (м<sup>2</sup>/с);  $\beta = 2,2 \cdot 10^{-8}$  (м/с).

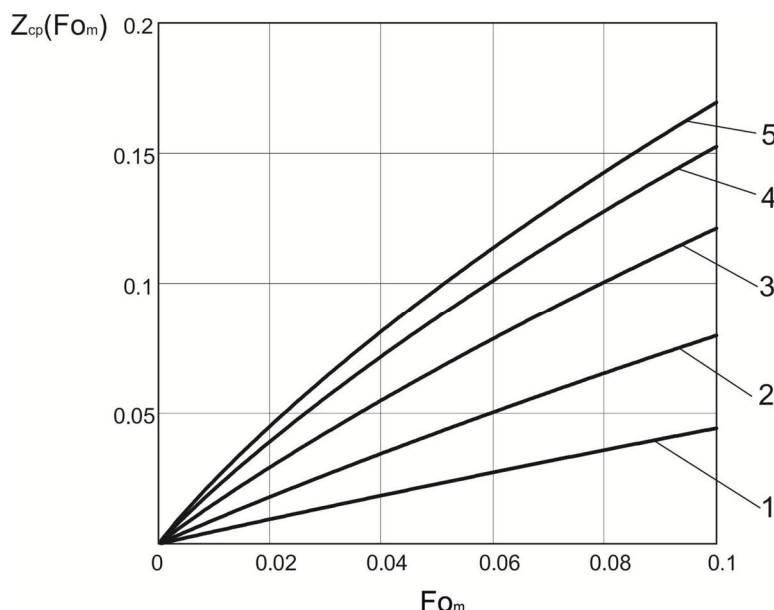
Некоторые результаты расчетов показаны на рисунках 3-5. Рисунок 3 иллюстрирует данные вычислений профилей безразмерных концентраций в зависимости от массообменного критерия Био. Анализ профилей концентраций по толщине бетона при  $Fo_m = 0,05$  показывает, что основной вклад процесса массопереноса сосредоточен в поверхностном слое на границе раздела «твердое – жидкость». При увеличении массообменного критерия Био появляются большие градиенты концентраций. Увеличение Био в шесть раз вызывает рост градиента концентраций в 3÷4,5 раза. Рисунок 4 показывает соответствующие этому случаю кинетические кривые накопления вещества в жидкости. На рисунке 5 показаны результаты расчетов изменения средней концентрации в бетоне, анализ которых показывает, что при значениях Био  $\leq 3$  средняя концентрация изменяется линейно.



**Рисунок 3 – Профили безразмерных концентраций по толщине бетона при  $Fo_m = 0,05$  с различными значениями  $Bi_m$ :**  
1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,75; 4 – 2,5; 5 – 3



**Рисунок 4 – Кинетика изменения концентрации переносимого компонента в жидкой фазе при следующих значениях  $Bi_m$ :**  
1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,75; 4 – 2,5; 5 – 3



**Рисунок 5 – Кинетика изменения средней безразмерной концентрации в бетоне для области малых значений чисел Фурье при следующих значениях  $Bim$ : 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,75; 4 – 2,5; 5 – 3**

Полученные выражения позволяют определять значение концентраций переносимого компонента – гидроксида кальция – по толщине конструкции в любой момент времени и, кроме того, дают возможность расчета содержаний этого вещества в жидкой фазе и среднее по толщине и объему конструкции, т.е. расчета кинетики процесса по твердой и жидкой фазам, что в конечном итоге позволяет с минимальной погрешностью прогнозировать долговечность и надежность объектов строительного комплекса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москвин, В.М. Коррозия бетона [Текст] / В.М. Москвин. – М.: Госстройиздат, 1952. – 342 с.
2. Розенталь, Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости [Текст] / Н.К. Розенталь. – М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центр проектной продукции в строительстве» (ФГУП ЦПП), 2006. – 520 с.
3. Федосов, С.В. Моделирование массопереноса в процессах жидкостной коррозии бетона I вида [Текст] / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.Л. Федосова, В.Л. Смельцов // Строительные материалы. – 2005. – №7. – С. 60-62.
4. Федосов, С.В. Моделирование массопереноса в процессах коррозии бетонов первого вида (малые значения числа Фурье) [Текст] / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.А. Хрунов, Л.Н. Аксаковская // Строительные материалы. – 2007. – №5. – С. 70-71.
5. Федосов, С.В. Прогнозирование долговечности строительных конструкций с позиций расчетного и экспериментального исследования процессов коррозии бетона [Текст] / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко, В.Л. Смельцов // Вестник ВолГАСУ. Серия «Строительство и архитектура», раздел «Строительные материалы и изделия». Вып. 14 (33). Волгоград: ВолГАСУ. – 2009. – С. 117-122.
6. Аксельруд Г.А. Экстрагирование (система твердое тело – жидкость) [Текст] / Г.А. Аксельруд, В.М. Лысянский. – М.: Химия, 1974. – 256 с.
7. Кельцев, Н.В. Основы адсорбционной техники [Текст] / Н.В. Кельцев. – М.: Химия, 1984. – 592 с.
8. Брунауэр, С. Адсорбция газов и паров [Текст] / С. Брунауэр. – М.: Издательство, 1948. – 781 с.
9. Карнаухов, А.П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов [Текст] / А.П. Карнаухов. – Новосибирск: Наука. 1999. – 470 с.
10. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
11. Федосов, С.В. Применение методов теории теплопроводности для моделирования процессов конвективной сушки [Текст] / С.В. Федосов, В.Н. Кисельников, Т.У. Шертаев. – Алма-Ата: Гылым, 1992. – 167 с.

### Федосова Нина Львовна

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Кандидат химических наук, профессор, заведующая кафедрой химии и охраны окружающей среды  
Тел.: +7 (4932) 37-34-36  
E-mail: k\_xooc@igasu.ru

**Румянцева Варвара Евгеньевна**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
доктор технических наук, профессор кафедры химии и охраны окружающей среды  
Тел.: +7 (4932)37-34-36  
E-mail: varrym@gmail.com

**Шестеркин Максим Евгеньевич**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Аспирант кафедры химии и охраны окружающей среды  
Тел.: +7 (4932)37-34-36  
E-mail: shesterkin86@mail.ru

**Манохина Юлия Валерьевна**

Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, г. Иваново  
Аспирант кафедры строительного материаловедения и специальных технологий  
Тел.: +7 (4932)37-34-36  
E-mail: manokh@inbox.ru

---

N.L. FEDOSOVA, V.Ye. RUMYANTSEVA, M.E. SHESTERKIN,  
Yu.V. MANOKHINA

**ON SOME PECULIARITIES MASS TRANSFER MODELING  
IN THE PROCESSES OF THE FIRST TYPE OF CORROSION  
OF CEMENT CONCRETE IN CLOSED SYSTEM «TANK - LIQUID»**

*It is shown that the principal determinant of mass transfer in the "concrete structure, cladding - liquid medium" is calcium hydroxide. The balance in the "solid - liquid" system is characterized by isotherms of sorption - desorption. There analyzed the linear dependence of the equilibrium concentration in the solid phase on the concentration in the liquid phase, obeying Henry's law. A mathematical model of mass transfer in liquid concrete corrosion of the first kind, is presented. It is given the solution of integral equations by Laplace transforms. Some results of calculations on the obtained expressions are presented in graphical form so as the change in concentration of the portable component in solid and liquid phases, as well as the average for design thickness it allows to predict the dynamics and kinetics of the studied processes of corrosion degradation.*

**Keywords:** corrosion, cement concrete, the liquid aqueous medium, diffusion, sorption-desorption isotherms, mass transfer, durability, Henry's law, mathematical modeling.

**BIBLIOGRAPHY**

1. Moskvina, V.M. Korrozija betona [Tekst] / V.M. Moskvina. – M.: Gosstrojizdat, 1952. – 342 s.
2. Rozental', N.K. Korroziionnaja stojkost' cementnyh betonov nizkoj i osobo nizkoj pronicaemosti [Tekst] / N.K. Rozental'. – M.: Federal'no gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatje «Centr proektnoj produkcii v stroitel'stve» (FGUP CPP), 2006. – 520 s.
3. Fedosov, S.V. Modelirovanie massoperenosa v processah zhidkostnoj korrozii betona I vida [Tekst] / S.V. Fedosov, V.E. Rumjanceva, N.L. Fedosova, V.L. Smel'cov // Stroitel'nye materialy. – 2005. – №7. – S. 60-62.
4. Fedosov, S.V. Modelirovanie massoperenosa v processah korrozii betonov pervogo vida (malye znachenija chisla Fur'e) [Tekst] / S.V. Fedosov, V.E. Rumjanceva, V.A. Hrunov, L.N. Aksakovskaja // Stroitel'nye materialy. – 2007. – №5. – S. 70-71.
5. Fedosov, S.V. Prognozirovanie dolgovechnosti stroitel'nyh konstrukcij s pozicij raschetnogo i jeksperimental'nogo issledovanija processov korrozii betona [Tekst] / S.V. Fedosov, V.E. Rumjanceva, N.S. Kas'janenko, V.L. Smel'cov // Vestnik VolgGASU. Serija «Stroitel'stvo i arhitektura», razdel «Stroitel'nye materialy i izdelija». Vyp. 14 (33). Volgograd: VolGASU. – 2009. – S. 117-122.

6. Aksel'rud G.A. Jekstragirovanie (sistema tverdoe telo – zhidkost') [Tekst] / G.A. Aksel'rud, V.M. Lysjanskij. – M.: Himija, 1974. – 256 s.
7. Kel'cev, N.V. Osnovy adsorbcionnoj tehniki [Tekst] / N.V. Kel'cev. – M.: Himija, 1984. – 592 s.
8. Brunaujer, S. Adsorbciya gazov i parov [Tekst] / S. Brunaujer. – M.: Izdatinlit, 1948. – 781 s.
9. Karnauhov, A.P. Adsorbciya. Tekstura dispersnyh i poristyh materialov [Tekst] / A.P. Karnauhov. – Novosibirsk: Nauka. 1999. – 470 s.
10. Korn, G. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov [Tekst] / G. Korn, T. Korn. – M.: Nauka, 1970. – 720 s.
11. Fedosov, S.V. Primenenie metodov teorii teploprovodnosti dlja modelirovanija processov konvektivnoj su-shki [Tekst] / S.V. Fedosov, V.N. Kisel'nikov, T.U. Shertaev. – Alma-Ata: Gylym, 1992. – 167 s.

**Fedosova Nina L'vovna**

Ivanovo state university of architecture and civil engineering, Ivanovo

Candidate of chemistry, professor managing of department of chemistry and environmental protection

Ph.: +7 (4932) 37-34-36

E-mail: k\_xooc@igasu.ru

**Rumyantseva Varvara Evgenyevna**

Ivanovo state university of architecture and civil engineering, Ivanovo

Doctor of technical science, professor of department of chemistry and environmental protection

Ph.: +7 (4932) 37-34-36

E-mail: varrym@gmail.com

**Shesterkin Maxim Evgenyevich**

Ivanovo state university of architecture and civil engineering, Ivanovo

Post-graduate student of department of chemistry and environmental protection

Ph.: +7 (4932) 37-34-36

E-mail: shesterkin86@mail.ru

**Manokhina Julia Valeryenva**

Ivanovo state university of architecture and civil engineering, Ivanovo

Post-graduate student of department of construction materials science and special technologies

Ph.: +7 (4932) 37-34-36

E-mail: manokh@inbox.ru

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

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

**В тексте статьи** не рекомендуется применять:

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

**Обязательные элементы:**

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** описывает цели и задачи проведенного исследования, а также возможности его практического применения, указывает, что нового несет в себе материал; рекомендуемый 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 28.12.2012 г.

Формат 70×108 1/16. Печ. л. 6,0.

Тираж 400 экз.

Заказ № \_\_\_\_\_

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